



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ



Ανάπτυξη Συστήματος Τηλεπισκόπησης Υετού Μέσω Μικροκυματικών Ζεύξεων

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΑΚΚΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννινα, 2024

Επιτροπή Διδακτορικής Διατριβής

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή

- Β. Χριστοφιλάκης (Επιβλέπων), Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Ε. Ευαγγέλου, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Χ. Λώλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.

Επταμελής εξεταστική επιτροπή

- Β. Χριστοφιλάκης (Επιβλέπων), Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Ε. Ευαγγέλου, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Χ. Λώλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Κ. Φουντάς, Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Ι. Παπαδόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Ν. Μάνθος, Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.
- Μ. Τσελεπή, Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής επιθυμώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όσους συνέβαλλαν με τον τρόπο τους σε αυτήν.

Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ελενίτσα και Ευάγγελο, για την καθοριστική τους υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια, χωρίς την οποία η παρούσα διατριβή δε θα ήταν δυνατή.

Επίσης, ευχαριστώ τον επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής, Επίκουρο Καθηγητή Βασίλειο Χριστοφιλάκη, για τη βοήθεια και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπλέον, είμαι ευγνώμων στο μέλος ΕΔΙΠ Γεώργιο Μπαλντούμα, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε διάφορα τεχνικά θέματα.

Για την παροχή των απαραίτητων μετεωρολογικών δεδομένων από τον μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή Χρήστο Λώλη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τις διάφορες υποδείξεις τους. Συγκεκριμένα, τον Ομότιμο Καθηγητή Νικόλαο Μάνθο, τους Αναπληρωτές Καθηγητές Ευάγγελο Ευαγγέλου και Ιωάννη Παπαδόπουλο, τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Φουντά, καθώς και την Επίκουρη Καθηγήτρια Μαρίνα Τσελεπή.

Τέλος, για το ενδιαφέρον και την ηθική τους στήριξη ευχαριστώ όλους μου τους φίλους, και ιδιαίτερα τη Χαρά Τζιάσιου, τον Στέφανο Μόσχο, τη Νίκη Χονδρέλλη, τον Μιχάλη Γκέρμπα, καθώς και τους αποφοιτήσαντες, πλέον, μεταπτυχιακούς φοιτητές Βασίλη Οικονόμου και Γιώργο Μυστρίδη.

Περίληψη

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής γίνονται όλο και πιο εμφανείς μέσω της αυξανόμενης συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων και περιβαλλοντικών καταστροφών κατά τα τελευταία χρόνια. Τόσο η βροχή, ως μια κρίσιμη μετεωρολογική παράμετρος, όσο και άλλες μετεωρολογικές παράμετροι διαδραματίζουν ζωτικής σημασίας ρόλο σε αυτά τα φαινόμενα, καθιστώντας την ακριβή μέτρησή τους αναγκαία. Οι συμβατικές μέθοδοι μέτρησης της βροχής, αν και προσφέρουν πολλά οφέλη, έχουν και περιορισμούς, συχνά λόγω της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας αυτής. Πρόσφατες έρευνες έχουν διερευνήσει μια νέα προσέγγιση για την εκτίμηση της έντασης της βροχής χρησιμοποιώντας την εξασθένηση σήματος σε μικροκυματικές ζεύξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Οι ζεύξεις αυτές, ως ευρέως διαδεδομένες που είναι, προσφέρουν μια πιθανή λύση σε ορισμένους από τους περιορισμούς των παραδοσιακών μεθόδων. Οι αξιόπιστες εκτιμήσεις της βροχής από την εξασθένηση σήματος θα μπορούσαν να συμπληρώσουν τις παραδοσιακές μεθόδους εκτίμησης και να αντιμετωπίσουν σε σημαντικό βαθμό τα ζητήματα χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας, δεδομένου ότι θα ήταν εφικτές οι μετρήσεις ισχύος σε πραγματικό χρόνο και για ευρεία χωρική κλίμακα. Έχει δημοσιευθεί πληθώρα υποσχόμενων σχετικών μελετών. Η πλειοψηφία τους έχει επικεντρωθεί σε συχνότητες άνω των 10 GHz, όπου η εξασθένηση λόγω της βροχής είναι υψηλή, διευκολύνοντας έτσι τη μέτρησή της. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιδίωξε να συνεισφέρει σε αυτό το πεδίο εξετάζοντας την εξασθένηση σήματος σε συχνότητες κάτω των 10 GHz, όπου υπάρχουν αρκετά πρότυπα επικοινωνίας και, παρόλα αυτά, η σχετική έρευνα παραμένει περιορισμένη. Για τον σκοπό αυτόν, αναπτύχθηκε μια εφαρμογή Android για την καταγραφή του δείκτη ισχύος λαμβανόμενου σήματος (RSSI) από μια κινητή συσκευή και χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις στη συχνότητα 4G/LTE των 2630 MHz, καθώς και μια εξειδικευμένη πειραματική διάταξη για επιπλέον μετρήσεις στις συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Η εφαρμογή Android παρείχε δεδομένα RSSI σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ενός σταθμού βάσης και της κινητής συσκευής, τα οποία αποθηκεύονταν κάθε 10 δευτερόλεπτα. Τέτοια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση της έντασης της βροχής σε πέντε κατηγορίες λόγω του περιορισμού της ακρίβειας 1 dB της κινητής συσκευής στις μετρήσεις RSSI, ο οποίος ήταν απαγορευτικός για την εκτίμηση της ακριβούς έντασης της βροχής. Ένα μοντέλο δέντρου αποφάσεων πέτυχε ακρίβεια 88.4% στην πρόβλεψη της σωστής κλάσης έντασης της βροχής. Επιπλέον, τα δεδομένα έδειξαν μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της απόλυτης υγρασίας και της ραδιοδιαθλαστικότητας του αέρα, ενώ δεν μπορούσε να αποκλειστεί μια πρόσθετη συσχέτιση με τη θερμοκρασία του αέρα. Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε έναν πομπό και έναν δέκτη υψηλής ακρίβειας, χρησιμοποιώντας μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία μικροταινίας που

σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για να λειτουργεί σε τρεις τρόπους λειτουργίας, με βάση μια τάση που εφαρμόζονταν σε μια δίοδο PIN σε αυτήν, και η οποία δεν ξεπερνούσε τα 900 mV. Κάθε λειτουργία βελτιστοποιούσε την αποδοτικότητα της κεραίας σε μία από τις τρεις συχνότητες. Περαιτέρω μετρήσεις μέσω της πειραματικής διάταξης αποκάλυψαν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης του σήματος και της έντασης της βροχής, με συντελεστές προσδιορισμού (R^2) 0.93, 0.83 και 0.90 για τις υπό μελέτη συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz αντίστοιχα. Τα ευρήματα αυτά επαληθεύουν τη δυνατότητα χρήσης μικροκυματικών ζεύξεων χαμηλότερων συχνοτήτων για αποτελεσματικές εκτιμήσεις της βροχής, προσφέροντας ένα οικονομικά αποδοτικό και αξιόπιστο συμπλήρωμα στις παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης.

Abstract

The impacts of climate change are increasingly evident through the rising frequency of extreme weather events and environmental disasters in recent years. Rainfall, as a critical meteorological parameter, and other meteorological parameters play a vital role in these phenomena, making their accurate measurement essential. Conventional rainfall measurement methods, while beneficial, have limitations, often due to its spatial and temporal variability. Recent research has explored a novel approach for estimating rainfall intensity using signal attenuation in microwave links employed in telecommunications. These links, widespread as they are, offer a potential solution to some of the limitations of traditional methods. Reliable rainfall estimates from signal attenuation could complement traditional estimation methods and significantly address spatial and temporal variability issues, since real-time and widespread power measurements would be feasible. A multitude of related promising studies have been published. Their majority has focused on frequencies above 10 GHz, where the attenuation due to rain is high, thus facilitating its measurement. The present doctoral dissertation sought to contribute to this field by examining signal attenuation at frequencies lower than 10 GHz, where several communication standards are prevalent, and yet, relevant research remains scarce. To this end, an Android application was developed to record the Received Signal Strength Indicator (RSSI) from a mobile device and was employed for measurements at the 4G/LTE frequency of 2630 MHz, as well as a specialized experimental setup for additional measurements at 2.07, 4.63 and 6.22 GHz. The Android application provided real-time RSSI data between a base station and the mobile device, stored every 10 seconds. Such data were employed for rainfall intensity classification into five categories due to the mobile device's 1 dB accuracy limitation in RSSI measurements, which was prohibitive for estimating the exact rainfall intensity. A decision tree model achieved an 88.4% accuracy in predicting the correct rainfall intensity class. Furthermore, the data showed a strong correlation between signal attenuation and absolute humidity and radio-refractivity of the air, while an additional correlation with air temperature could not be ruled out. The experimental setup comprised a transmitter and a high-accuracy receiver, utilizing a reconfigurable microstrip antenna designed and implemented to operate in three modes, based on a voltage applied to a PIN diode on it, and which did not exceed 900 mV. Each mode optimized the antenna's performance on one of the three frequencies. Further measurements using the experimental setup revealed a strong correlation between signal attenuation and rainfall intensity, with determination coefficients (R^2) of 0.93, 0.83, and 0.90 for the studied frequencies of 2.07, 4.63 and 6.22 GHz respectively. These findings validate the potential of

using lower frequency microwave links for effective rainfall estimations, offering a cost-effective and reliable complement to traditional measurement methods.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xxi
Κατάλογος Ακρωνυμίων	xxiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα	1
1.2 Εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραίες	4
1.3 Βασικές παράμετροι των κεραιών	6
1.3.1 Εύρος ζώνης	6
1.3.2 Κατευθυντικότητα	7
1.3.3 Αποδοτικότητα	7
1.3.4 Κέρδος	8
1.3.5 Περιοχές Πεδίου	9
1.3.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας	10
1.3.7 Πόλωση	11
1.4 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	12
1.5 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	13
1.6 Μικροκύματα	14
1.7 Εξασθένηση μικροκυμάτων λόγω της βροχής	15
1.8 Καθιερωμένες τεχνικές μέτρησης της έντασης της βροχής και μια εναλλακτική προσέγγιση μέσω της εξασθένησης σήματος	19
1.8.1 Συμβατικές μέθοδοι μέτρησης της έντασης της βροχής	20
Βροχόμετρα	20
Δισδρόμετρα	21
Ραντάρ Καιρού	22
Μετεωρολογικοί δορυφόροι	23
1.8.2 Εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος μικροκυματικών ζεύξεων	24
Μελέτες σχετικές με την εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω εμπορικών μικροκυματικών ζεύξεων	25

Μελέτες σχετικές με την εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω εξειδικευμένων πειραματικών διατάξεων.....	31
Μελέτες σχετικές με τις δυσκολίες εκτίμησης της έντασης της βροχής μέσω μικροκυματικών ζεύξεων	33
Μελέτες σχετικές με την εκτίμηση άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων μέσω μικροκυματικών ζεύξεων	35
1.9 Σκοπός της διατριβής	36
2 Υλοποίηση Εφαρμογής Android για την Καταγραφή της Ισχύος Σήματος	39
2.1 Εισαγωγή	39
2.2 Το λειτουργικό σύστημα Android	39
2.3 Το αναπτυξιακό περιβάλλον Android Studio	42
2.4 Ανάπτυξη της εφαρμογής	44
2.4.1 Τα κύρια χαρακτηριστικά της εφαρμογής	45
2.4.2 Ο κώδικας της εφαρμογής	49
Οι βασικές βιβλιοθήκες.....	51
Ο απαραίτητες άδειες	53
Ρυθμίσεις που πρέπει να απενεργοποιηθούν για την αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα.....	55
Οι κύριες λειτουργίες	56
3 Υλοποίηση Εξειδικευμένης Πειραματικής Διάταξης	59
3.1 Εισαγωγή	59
3.2 Ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi	59
3.2.1 Ιστορικά στοιχεία	59
3.2.2 Το μοντέλο Raspberry Pi 4 Model B	60
3.2.3 Το λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi OS	62
3.2.4 Η πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board του Raspberry Pi.....	64
Ο μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό DAC8552	65
Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADS1256.....	67
3.3 Υλοποίηση του συστήματος του πομπού	71
3.3.1 Το υλικό μέρος του συστήματος του πομπού	72
Η κεραία χοάνης.....	73
Ο ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση CVCO55CC-1912-2114.....	75
Ο ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση HMC429LP4	76
Ο ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση HMC358MS8G	77
Ο δακόπτης RF HMC536MS8G	79
Ο ενισχυτής ZX60-83LN-S+	80
Υλοποίηση πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος για τους τρεις ταλαντωτές ελεγχόμενους από τάση.....	81

Υλοποίηση πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος με διακόπτες για τον έλεγχο της τροφοδοσίας κάθε VCO	83
Διασύνδεση των διαφόρων μερών του συστήματος του πομπού	89
3.3.2 Το λογισμικό μέρος του συστήματος του πομπού	90
3.4 Υλοποίηση του συστήματος του δέκτη	95
3.4.1 Το υλικό μέρος του συστήματος του δέκτη	97
Το ζωνοπερατό φίλτρο BP0805A2160ASTR	97
Το ζωνοπερατό φίλτρο BFCV-5270+	98
Ο ανιχνευτής ισχύος AD8318	99
Υλοποίηση πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος για την ανίχνευση της ισχύος σήματος	102
Διασύνδεση των διαφόρων μερών του συστήματος του δέκτη	105
3.4.2 Το λογισμικό μέρος του συστήματος του δέκτη	106
3.4.3 Η βάση δεδομένων	111
3.4.4 Ευαισθησία, λόγος σήματος προς θόρυβο και ανάλυση του συστήματος του δέκτη	113
4 Υλοποίηση Επαναπροσδιοριζόμενης Κεραίας για το Σύστημα του Δέκτη	117
4.1 Εισαγωγή	117
4.2 Κεραίες μικροταινίας	117
4.3 Επαναπροσδιοριζόμενες κεραίες	119
4.4 Υλοποίηση της κεραίας	121
4.4.1 Η γεωμετρία της κεραίας	122
4.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων της κεραίας	123
4.4.3 Αποτελέσματα μετρήσεων της υλοποιημένης κεραίας	128
5 Πειραματικά Αποτελέσματα	137
5.1 Εισαγωγή	137
5.2 Μετεωρολογικές παράμετροι	137
5.3 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εφαρμογής Android	139
5.3.1 Τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων	140
5.3.2 Αποτελέσματα	143
Ταξινόμηση της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος	143
Διερεύνηση της συσχέτισης άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων με την ισχύ σήματος	149
5.4 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης	152
5.4.1 Τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων	152
5.4.2 Αποτελέσματα	154
6 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	161

Παραρτήματα

A	Αριθμός Καναλιού και Συχνότητα Φέροντος σε μια Ζεύξη 4G/LTE	167
B	Η Σειριακή Περιφερειακή Διεπαφή (SPI)	169
Γ	Ο Κώδικας της Εφαρμογής Android	175
	Γ.1 Το αρχείο AndroidManifest.xml.....	175
	Γ.2 Το αρχείο activity_main.xml	176
	Γ.3 Το αρχείο MainActivity.kt.....	178
Δ	Ο Κώδικας του Raspberry Pi του Πομπού και του Δέκτη	191
	Δ.1 Ορισμός κλάσης για τον DAC8552	191
	Δ.2 Ορισμός κλάσης για τον ADS1256	192
	Δ.3 Ο κυρίως κώδικας του πομπού	194
	Δ.4 Ο κυρίως κώδικας του δέκτη	196
Ε	Προβολή σε Πραγματικό Χρόνο των Μετρήσεων Ισχύος που Αποθηκεύονται στη Βάση Δεδομένων	201
ΣΤ	Αποστολή Μηνυμάτων από το Raspberry Pi προς έναν Server της Κοινωνικής Πλατφόρμας Discord	205
	ΣΤ.1 Ο κώδικας για την αποστολή των μηνυμάτων.....	206
	ΣΤ.2 Αυτοματοποίηση του σεναρίου αποστολής μηνυμάτων	208
	Βιβλιογραφία	211
	Σύντομο Βιογραφικό	223
	Δημοσιεύσεις	225

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1:	Απεικόνιση ενός επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται στη θετική κατεύθυνση του άξονα x.....	3
Σχήμα 1.2:	Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του Hertz για την παραγωγή και την ανίχνευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	4
Σχήμα 1.3:	Διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου (E) και του μαγνητικού πεδίο (B), στην περίπτωση μιας αυθαίρετης χρονικής στιγμής, κατά την εκπομπή από μια κεραία ημικύματος.....	5
Σχήμα 1.4:	Απεικόνιση της γωνιακής εξάρτησης της έντασης της ακτινοβολίας που παράγεται από ένα δίπολο, σε ένα (α) δυσδιάστατο και ένα (β) τρισδιάστατο διάγραμμα.....	6
Σχήμα 1.5:	Απλοποιημένη απεικόνιση της κατανομής της ακτινοβολίας μιας κεραίας με κέρδος μεγαλύτερο του μηδενός, ως προς αυτήν μιας ισοτροπικής κεραίας.....	8
Σχήμα 1.6:	Οι περιοχές πεδίου γύρω από μια κεραία.....	10
Σχήμα 1.7:	Απεικόνιση της μορφής του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας κεραίας.....	10
Σχήμα 1.8:	Απεικόνιση ενός γραμμικά πολωμένου κύματος (αριστερά), ενός κυκλικά πολωμένου (κέντρο) και ενός ελλειπτικά πολωμένου (δεξιά).....	11
Σχήμα 1.9:	Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	12
Σχήμα 1.10:	Φάσμα απορρόφησης του επικρατέστερου ισότοπου του νερού, H ₂ ¹⁶ O.....	16
Σχήμα 1.11:	Γενική σχηματική απεικόνιση της σκέδασης από μια σταγόνα βροχής.....	17
Σχήμα 2.1:	Η αρχιτεκτονική του λειτουργικού συστήματος Android.....	40
Σχήμα 2.2:	Όψη του περιβάλλοντος Android Studio.....	43
Σχήμα 2.3:	Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής Android όταν η υπηρεσία καταγραφής δεδομένων είναι (α) απενεργοποιημένη ή (β) ενεργοποιημένη.....	45
Σχήμα 2.4:	Η ειδοποίηση που εμφανίζεται στη μπάρα ειδοποιήσεων μιας συσκευής Android όταν η υπηρεσία καταγραφής δεδομένων RSSI είναι ενεργή.....	46

Σχήμα 2.5:	Το πρώτο μέρος του πίνακα καναλιών E-UTRA του δικτύου 4G/LTE για τον προσδιορισμό της συχνότητας φέροντος κατά τη λήψη (downlink) ή την εκπομπή (uplink) δεδομένων, όπως ορίζεται στην τεχνική προδιαγραφή 3GPP TS 31.101.....	49
Σχήμα 2.6:	Διάγραμμα ροής του κώδικα της εφαρμογής Android.....	50
Σχήμα 2.7:	Τα μηνύματα που εμφανίζονται στην εφαρμογή όταν δεν έχουν παραχωρηθεί άδειες πρόσβασης (α) στην κατάσταση, (β) την τοποθεσία, (γ) τον αποθηκευτικό χώρο της συσκευής Android, καθώς και (δ) το επακόλουθο μήνυμα που εμφανίζεται όταν ο χρήστης αρνηθεί τουλάχιστον μια από τις άδειες.	53
Σχήμα 2.8:	Προειδοποιητικό μήνυμα που εμφανίζει η εφαρμογή στον χρήστη όταν είναι ενεργοποιημένη για αυτή η λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας.....	56
Σχήμα 3.1:	Απεικόνιση του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 4 Model B.	61
Σχήμα 3.2:	Διάγραμμα της ακιδοσειράς GPIO του Raspberry Pi 4 Model B, με τη λειτουργία της κάθε ακίδας και την αρίθμηση εκείνων που είναι προγραμματιζόμενες.....	62
Σχήμα 3.3:	Η επιφάνεια εργασίας του λειτουργικού συστήματος Raspberry Pi OS.	63
Σχήμα 3.4:	Η πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board του Raspberry Pi.....	64
Σχήμα 3.5:	(α) Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του DAC8552, καθώς και (β) σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του.....	65
Σχήμα 3.6:	Η δομή του καταχωρητή εισόδου του DAC8552.	66
Σχήμα 3.7:	(α) Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του ADS1256, καθώς και (β) σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του.....	68
Σχήμα 3.8:	Η δομή των καταχωρητών (α) MUX και (β) DRATE του ADS1256.	69
Σχήμα 3.9:	Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος του πομπού.....	71
Σχήμα 3.10:	Η κεραία χοάνης που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα του πομπού.	73
Σχήμα 3.11:	Ο λόγος στάσιμου κύματος της κεραίας χοάνης για συχνότητες από 1 έως 9 GHz.....	74
Σχήμα 3.12:	Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας χοάνης στο αζιμουθιακό επίπεδο παρουσία του κυματοδηγού (κόκκινο) καθώς και όταν δεν χρησιμοποιείται κυματοδηγός (μπλε).	74
Σχήμα 3.13:	Το κέρδος της κεραίας χοάνης για συχνότητες από 1 έως 9 GHz, παρουσία του κυματοδηγού (κόκκινο), καθώς και όταν δεν χρησιμοποιείται κυματοδηγός (μπλε).	75

Σχήμα 3.14: Γενική απεικόνιση της (α) κάτω και της (β) πάνω πλευράς του CVCO55CC-1912-2114, με την είσοδο τροφοδοσίας (VCC), ρυθμιστικής τάσης (V_t), και την έξοδό του (RF).	76
Σχήμα 3.15: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της συχνότητας του σήματος εκπομπής του CVCO55CC-1912-2114 (κάθετος άξονας) ως προς τη ρυθμιστική τάση (οριζόντιος άξονας).....	76
Σχήμα 3.16: Διάγραμμα των εισόδων τροφοδοσίας (Vcc και GND) και ρυθμιστικής τάσης (VTUNE), καθώς και της εξόδου σήματος (RFOUT) του HMC429LP4. Τα σημεία N/C δεν συνδέονται εσωτερικά στο κύκλωμα.	77
Σχήμα 3.17: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της (α) συχνότητα και της (β) ισχύος του σήματος εκπομπής του HMC429LP4 (κάθετος άξονας) ως προς τη ρυθμιστική τάση (οριζόντιος άξονας).	77
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα των εισόδων τροφοδοσίας (Vcc και GND) και ρυθμιστικής τάσης (VTUNE), καθώς και της εξόδου σήματος (RFOUT) του HMC358MS8G. Τα σημεία N/C δεν συνδέονται εσωτερικά στο κύκλωμα.	78
Σχήμα 3.19: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της (α) συχνότητας και της (β) ισχύος του σήματος εκπομπής του HMC358MS8G (κάθετος άξονας) ως προς τη ρυθμιστική τάση (οριζόντιος άξονας).	78
Σχήμα 3.20: Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του HMC536MS8G.....	79
Σχήμα 3.21: Γενική φωτογραφία του ZX60-83LN-S+.....	80
Σχήμα 3.22: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής του (α) κέρδους και του (β) noise figure (κάθετος άξονας) του ZX60-83LN-S+ ως προς τη συχνότητα (οριζόντιος άξονας).....	81
Σχήμα 3.23: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας του πομπού με τους τρεις VCOs όπως σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad.	81
Σχήμα 3.24: Το σχέδιο της πλακέτας των τριών VCO του πομπού και η τοπολογία των εξαρτημάτων της στον PCB Editor του KiCad.....	83
Σχήμα 3.25: Φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας των τριών VCOs του πομπού.....	83
Σχήμα 3.26: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας των τριών διακοπών-τρανζίστορ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κάθε VCO, όπως σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad.....	84
Σχήμα 3.27: Γραφική απεικόνιση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού (V_{CE} , κάθετος άξονας) ως προς το ρεύμα βάσης (I_B , οριζόντιος άξονας) για διάφορες τιμές του ρεύματος συλλέκτη (I_C), για το τρανζίστορ 2N4403.....	86

Σχήμα 3.28: Το σχέδιο της πλακέτας των τριών διακοπών-τρανζίστορ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κάθε VCO, καθώς και η τοπολογία των εξαρτημάτων στον PCB Editor του KiCad.....	88
Σχήμα 3.29: Φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας των τριών διακοπών-τρανζίστορ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κάθε VCO.	88
Σχήμα 3.30: Η τελική μορφή του υπό δοκιμή συστήματος του πομπού.....	90
Σχήμα 3.31: Διάγραμμα ροής του κώδικα που τρέχει στον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi του συστήματος του πομπού.	91
Σχήμα 3.32: Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος του δέκτη.	95
Σχήμα 3.33: (α) Γενική φωτογραφία του ζωνοπερατού φίλτρου BP0805A2160ASTR και (β) διάγραμμα με την είσοδο (IN), την έξοδο (OUT) και τα σημεία γείωσής του (GND).....	97
Σχήμα 3.34: Γραφική απεικόνιση των απωλειών (κάθετος άξονας) λόγω ανακλάσεων στην είσοδο του φίλτρου (RL, πορτοκαλί χρώμα) BP0805A2160ASTR, καθώς και εκείνων λόγω της διέλευσης του σήματος από το φίλτρο (IL, μπλε χρώμα), ως προς τη συχνότητα (οριζόντιος άξονας).	98
Σχήμα 3.35: Γενική φωτογραφία του ζωνοπερατού φίλτρου BFCV-5270+ και των σημείων εισόδου (RF IN), καθώς και εξόδου (RF OUT) σήματος και γείωσης (GROUND).....	99
Σχήμα 3.36: Γραφική απεικόνιση (α) των απωλειών λόγω της διέλευσης ενός σήματος από το φίλτρο (Insertion Loss) και (β) του λόγου στάσιμου κύματος (VSWR), ως προς τη συχνότητα (Frequency) για το ζωνοπερατό φίλτρο BFCV-5270+. ..	99
Σχήμα 3.37: (α) Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων, και (β) σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του ανιχνευτή ισχύος AD8318.	100
Σχήμα 3.38: Γραφική αναπαράσταση της εξάρτησης μεταξύ της ισχύος του σήματος στην είσοδο και της τάσης στην έξοδο του AD8318, καθώς και της μεταβολής του σφάλματος, για συχνότητα (α) 2.2 GHz και (β) 5.8GHz, με την τιμή της αντίστασης R_{TADJ} να είναι 500 και 1000 Ω αντίστοιχα. Οι κόκκινες, μαύρες και μπλε καμπύλες αφορούν αντίστοιχα θερμοκρασία λειτουργίας +85°C, +25°C και -40°C.	101
Σχήμα 3.39: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας ανίχνευσης της ισχύος σήματος όπως σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad.	103
Σχήμα 3.40: Το σχέδιο της πλακέτας ανίχνευσης ισχύος, καθώς και η τοπολογία των εξαρτημάτων στον PCB Editor του KiCad.	104
Σχήμα 3.41: Φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας ανίχνευσης ισχύος.....	105

Σχήμα 3.42: Η τελική μορφή του υπό δοκιμή συστήματος του δέκτη.	106
Σχήμα 3.43: Διάγραμμα ροής του κώδικα που τρέχει στον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi του συστήματος του δέκτη.	107
Σχήμα 3.44: Η διεπαφή του SQL Server Configuration Manager.	112
Σχήμα 3.45: Το περιβάλλον του SQL Server Management Studio και ένα παράδειγμα πραγματικών δεδομένων που καταγράφηκαν από το σύστημα του δέκτη για τη συχνότητα των 2.07 GHz.	113
Σχήμα 4.1: Η γενική μορφή μιας κεραίας μικροταινίας με ορθογώνιο ακτινοβόλο στοιχείο, καθώς και οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου.	118
Σχήμα 4.2: Η γεωμετρία της κεραίας: (α) μπροστά όψη και (β) πίσω όψη.	122
Σχήμα 4.3: Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου PIN όταν είναι (α) ανάστροφα πολωμένη και (β) ορθά πολωμένη.	124
Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα της παραμέτρου S11 και του VSWR για τους τρεις τρόπους λειτουργίας της κεραίας όπως προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων.	125
Σχήμα 4.5: Τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας όπως προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων για τις συχνότητες (α) 2.04 GHz, (β) 4.44 GHz και (γ) 6.42 GHz.	126
Σχήμα 4.6: Κατανομή των επιφανειακών ρευμάτων της κεραίας όπως προέκυψε μέσω προσομοιώσεων για τις συχνότητες (α) 2.04 GHz, (β) 4.44 GHz και (γ) 6.42 GHz.	127
Σχήμα 4.7: Η υλοποιημένη κεραία: (α) μπροστά όψη και (β) πίσω όψη.	129
Σχήμα 4.8: Η διάταξη για τη μέτρηση της παραμέτρου S11 και του VSWR της κεραίας (α) πριν την εισαγωγή της διόδου PIN και (β) μετά την εισαγωγή της διόδου PIN, με την κεραία να λειτουργεί υπό το mode 3.	129
Σχήμα 4.9: Πειραματικά αποτελέσματα της παραμέτρου S11 και του VSWR της κεραίας για τους τρεις τρόπους λειτουργίας της.	130
Σχήμα 4.10: Σχηματικό διάγραμμα του χώρου όπου έγιναν οι μετρήσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της κεραίας.	131
Σχήμα 4.11: Φωτογραφία της διάταξης και του χώρου όπου έγιναν οι μετρήσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της κεραίας.	131
Σχήμα 4.12: Διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας στο αζιμουθιακό (αριστερά) και το κατακόρυφο επίπεδο (δεξιά) όπως προέκυψαν μέσω μετρήσεων (μπλε χρώμα) για τις συχνότητες (α, β) 2.07 GHz, (γ, δ) 4.63 GHz και (ε, στ) 6.22 GHz, και μέσω προσομοιώσεων (κόκκινο χρώμα) για τις συχνότητες (α, β) 2.04 GHz, (γ, δ) 4.44 GHz και (ε, στ) 6.42 GHz.	132

Σχήμα 5.1:	Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.....	138
Σχήμα 5.2:	Ροή εργασιών που ακολουθήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων RSSI μέσω της εφαρμογής Android.....	140
Σχήμα 5.3:	Χάρτης που απεικονίζει τη θέση του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (AMS, μπλε χρώμα), των σταθμών βάσης πομποδεκτών της ευρύτερης περιοχής (BTS 1 έως 6, κόκκινο χρώμα) και της κινητής συσκευής (CT, πράσινο χρώμα).	141
Σχήμα 5.4:	Φωτογραφία στο ύψος του εδάφους της περιοχής μεταξύ της κινητής συσκευής και του σταθμού βάσης BTS 1.	143
Σχήμα 5.5:	Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος που μετρήθηκε από την κινητή συσκευή (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες (α) 28 Μαΐου 2023, (β) 30 Μαΐου 2023, (γ) 3 Ιουνίου 2023, (δ) 4 Ιουνίου 2023 και (ε) 17 Οκτωβρίου 2023.....	144
Σχήμα 5.6:	Γενικό διάγραμμα ενός δέντρου ταξινόμησης.....	146
Σχήμα 5.7:	Πίνακας σύγχυσης του μοντέλου δέντρου αποφάσεων που εκπαιδεύτηκε για την πρόβλεψη της κλάσης της βροχής με βάση τα δεδομένα εξασθένησης σήματος, καθώς και τα πραγματικά θετικά ποσοστά (TPR) και τα ψευδώς αρνητικά ποσοστά (FNR) που αφορούν κάθε μια από τις κλάσεις.....	147
Σχήμα 5.8:	Γραφική αναπαράσταση, με τη μορφή πίνακα συσχέτισης, που απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας (T), της σχετικής υγρασίας (RH), της απόλυτης υγρασίας (AH), της ατμοσφαιρικής πίεσης (P), της ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα (N) και της απώλειας ισχύος. Οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης Pearson επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι συντελεστές συσχέτισης Spearman παρουσιάζονται με μπλε χρώμα.	150
Σχήμα 5.9:	Γραφική απεικόνιση της εξασθένησης σήματος σε σχέση με (α) την απόλυτη υγρασία (AH), (β) τη ραδιο-διαθλαστικότητα του αέρα (N) και (γ) τη θερμοκρασία (T) και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης Pearson και Spearman.....	151
Σχήμα 5.10:	Ροή εργασιών που ακολουθήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ισχύος σήματος μέσω του πομπού και του δέκτη της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε.....	153
Σχήμα 5.11:	Η τοποθέτηση του πομπού (Tx) και του δέκτη (Rx) στα κτήρια Φ2 και Φ3 του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.....	153

Σχήμα 5.12: Χάρτης ενός μέρους της πανεπιστημιούπολης του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ο οποίος περιλαμβάνει τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού καθώς και την τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων.	154
Σχήμα 5.13: Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος συχνότητας 2.07 GHz (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες (α) 24 Φεβρουαρίου 2024, (β) 29 Φεβρουαρίου με 1 Μαρτίου 2024, (γ) 4 Μαρτίου 2024, (δ) 26 Μαρτίου 2024 και (ε) 18 Απριλίου 2024.	155
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος συχνότητας 4.63 GHz (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες (α) 19 Φεβρουαρίου 2024, (β) 20 Φεβρουαρίου 2024, (γ) 7 Μαρτίου 2024, (δ) 26 Μαρτίου 2024 και (ε) 8 Μαΐου 2024.	156
Σχήμα 5.15: Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος συχνότητας 6.22 GHz (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες (α) 4 Μαρτίου 2024, (β) 25 Απριλίου 2024, (γ) 12 Μαΐου 2024, (δ) 16 Μαΐου 2024 και (ε) 28 Μαΐου 2024.	157
Σχήμα 5.16: Δεδομένα ειδικής εξασθένησης λόγω της βροχής και προσαρμογή σε κάθε περίπτωση μιας καμπύλης του νόμου δύναμης (1.33) για τις συχνότητες των 2.07, 4.63 και 6.22 GHz.	159
Σχήμα Β.1: Διασύνδεση μιας συσκευής master με μια συσκευή slave στα πλαίσια της διεπαφής SPI, και η κατεύθυνση του κάθε σήματος.	170
Σχήμα Β.2: Οργάνωση των bit στους καταχωρητές ολίσθησης των συσκευών master και slave κατά την ανταλλαγή δεδομένων μέσω της διεπαφής SPI.	171
Σχήμα Β.3: Απεικόνιση της μορφής της επικοινωνίας στα πλαίσια της διεπαφής SPI, για τις διάφορες τιμές της πολικότητας ρολογιού (CPOL) και της φάσης του ρολογιού (CPHA).	172
Σχήμα Β.4: Η ανεξάρτητη συνδεσμολογία στη διεπαφή SPI.	173
Σχήμα Β.5: Η αλυσιδωτή συνδεσμολογία στη διεπαφή SPI.	174
Σχήμα Ε.1: Το γράφημα που εμφανίζει το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε με σκοπό την προβολή των δεδομένων ισχύος σε πραγματικό χρόνο.	201
Σχήμα ΣΤ.1: Απεικόνιση των μηνυμάτων που αποστέλλονταν από το σύστημα του δέκτη προς τον server της κοινωνικής πλατφόρμας Discord κάθε φορά που πραγματοποιούνταν οποιαδήποτε αλλαγή στη διεύθυνση IP του.	206

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ονομασίες των περιοχών που συγκροτούν το φάσμα των μικροκυμάτων, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 521-2002.....	14
Πίνακας 2.1: Παράδειγμα μετρήσεων ενός λεπτού που έγιναν μέσω της εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες, όπως αυτές καταγράφηκαν σε ένα αρχείο κειμένου.	48
Πίνακας 3.1: Βασικά χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 4 Model B.	61
Πίνακας 3.2: Οι δύο πιθανές καταστάσεις του διακόπτη HMC536MS8G ανάλογα με το επίπεδο τάσης στις εισόδους A και B.....	80
Πίνακας 3.3: Προτεινόμενες τιμές της αντίστασης R_{TADJ} , μέσω της οποίας γειώνεται το σημείο TADJ του AD8318, για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της συσκευής στην περιοχή συγκεκριμένων συχνοτήτων.	101
Πίνακας 4.1: Οι τιμές των παραμέτρων σχεδίασης της κεραίας.	123
Πίνακας 4.2: Σύνοψη των αποτελεσμάτων προσομοίωσης της κεραίας για τους τρεις βασικούς συντονισμούς στην περιοχή των 2, 4 και 6 GHz.	128
Πίνακας 4.3: Σύνοψη των αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων της υλοποιημένης κεραίας για τους τρεις βασικούς συντονισμούς στην περιοχή των 2, 4 και 6 GHz.....	134
Πίνακας 5.1: Γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (AMS) και των σταθμών βάσης πομποδεκτών της ευρύτερης περιοχής, καθώς και απόσταση κάθε σταθμού βάσης από τον μετεωρολογικό σταθμό.....	141
Πίνακας 5.2: Παράμετροι το σταθμού βάσης BTS 1.	143
Πίνακας 5.3: Σύγκριση της ακρίβειας, με βάση το αληθώς θετικό ποσοστό (TPR), για τα πέντε μοντέλα που εκπαιδεύτηκαν: Δέντρο Αποφάσεων, Μηχανή Διανυσμάτων Υποστήριξης (SVM), K-Πλησιέστεροι Γείτονες (KNN), Προσαρμοστική Ενίσχυση (AdaBoost) και Νευρωνικό Δίκτυο Εμπρόσθιας Τροφοδότησης (FNN).	149
Πίνακας 5.4: Τιμές των συντελεστών της σχέσης (1.33), της τυπικής απόκλισης (σ) για κάθε έναν από αυτούς, καθώς και του συντελεστή προσδιορισμού (R^2),	

όπως προέκυψαν από την προσαρμογή της καμπύλης που περιγράφει η σχέση αυτή στα δεδομένα κάθε συχνότητας..... 160

Πίνακας Α.1: Πίνακας καναλιών E-UTRA του δικτύου 4G/LTE για τον προσδιορισμό της συχνότητας φέροντος κατά τη λήψη (downlink) ή την εκπομπή (uplink) δεδομένων, όπως ορίζεται στην τεχνική προδιαγραφή 3GPP TS 31.101..... 167

Πίνακας Β.1: Οι τέσσερις λειτουργίες της διεπαφής SPI..... 172

Κατάλογος Ακρωνυμίων

Ακρωνύμιο	Πλήρες Όνομα
3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G NR	5th Generation New Radio
AdaBoost	Adaptive Boosting
ADC	Analog to Digital Converter
AMS	Automatic Meteorological Station
AOSP	Android Open-Source Project
API	Application Programming Interface
APK	Android Package Kit
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number
ART	Android Runtime
BJT	Bipolar Junction Transistor
BLE	Bluetooth Low Energy
BTS	Base Transceiver Station
Cell ID	Cell Identity
CID	Cell Identity
CML	Commercial Microwave Link
CPU	Central Processing Unit
CR	Cognitive Radio
CS	Chip Select
CSI	Camera Serial Interface
CT	Cellular Terminal
DAC	Digital to Analog Converter
DAQ	Data Acquisition System
dBi	Decibels Relative to Isotropic
DEX	Dalvik Executable
DGS	Defected Ground Structure
DPI	Display Pixel Interface
DSD	Drop Size Distribution
DSI	Display Serial Interface
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
FNN	Feedforward Neural Network
FNR	False Negative Rate
FR4	Flame Retardant 4
FSPL	Free Space Path Loss
GCP	Google Cloud Platform

GPCLK	General Purpose Clock
GPIO	General-Purpose Input/Output
GSM	Global System for Mobile communications
GUI	Graphical User Interface
HAL	Hardware Abstraction Layer
HAT	Hardware Attached on Top
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit
IEEE 802.15.4	Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard 802.15.4
IL	Insertion Loss
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IoT	Internet of Things
IPC	Inter-Process Communication
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
ITU_R	International Telecommunications Union – Radiocommunication Sector
JSON	JavaScript Object Notation
KNN	K-Nearest Neighbors
LAC	Location Area Code
LED	Light Emitting Diode
LoRa	Long Range
LOS	Line Of Sight
LPDDR4-3200	Low Power Double Data Rate 4 - 3200
LTE	Long-Term Evolution
LTS	Long-Term Support
LXDE	Lightweight X11 Desktop Environment
MCC	Mobile Country Code
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MIPI	Mobile Industry Processor Interface
MISO	Master In Slave Out
MNC	Mobile Network Code
MOSI	Master Out Slave In
NDK	Native Development Kit
NMS	Network Management System
ODBC	Open Database Connectivity
OWSN	Opportunistic Wireless Sensor Networks
PCB	Printed Circuit Board
PCM	Pulse Code Modulation
PGA	Programmable Gain Amplifier
PIN	Positive-Intrinsic-Negative
PL	Path Loss
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PWM	Pulse Width Modulation
QPE	Quantitative Precipitation Estimation
RAM	Random Access Memory

RDATA	Read Data
ReLU	Rectified Linear Unit
RF	Radio Frequency
RF MEMS	RF Microelectromechanical System
RL	Return Loss
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SCK	Serial Clock
SCLK	Serial Clock
SDIO	Secure Digital Input Output
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory
SMA	Subminiature version A
SMD	Surface-Mount Device
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
SPS	Samples Per Second
SQL	Structure Query Language
SS	Slave Select
SSMS	SQL Server Management Studio
SVM	Support Vector Machine
SYNC	Synchronize
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDS	Tabular Data Stream
TPR	True Positive Rate
UARFCN	UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UI	User Interface
URL	Uniform Resource Locator
USB	Universal Serial Bus
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UV	Ultraviolet
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VGA	Variable Gain Amplifier
VNA	Vector Network Analyzer
VNC	Virtual Network Computing
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
VVA	Variable Voltage Attenuator
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local-Area Network
WREG	Write to Register

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προβλέφθηκαν θεωρητικά το 1864 από τον Σκοτσέζο φυσικό James Clerk Maxwell, όταν σε μια δημοσίευσή του με τίτλο “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field” εισήγαγε ένα σύνολο εξισώσεων για την περιγραφή του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου [1]. Οι εξισώσεις αυτές έπειτα από τροποποίηση συγχωνεύτηκαν, καταλήγοντας τελικά σε τέσσερις εξισώσεις, οι οποίες σήμερα είναι γνωστές ως οι εξισώσεις του Maxwell και σε διαφορική μορφή γράφονται ως εξής:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho, \quad (1.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (1.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

όπου \vec{E} και \vec{B} είναι το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα, ϵ_0 και μ_0 είναι αντίστοιχα η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ρ η πυκνότητα φορτίου και \vec{J} η πυκνότητα ρεύματος. Οι εξισώσεις αυτές ισχύουν για ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία στο κενό. Στην περίπτωση της ύλης, τα ϵ_0 και μ_0 θα πρέπει να αντικατασταθούν με τις αντίστοιχες τιμές τους στο εσωτερικό αυτής, ϵ και μ . Στις εξισώσεις του Maxwell εμπεριέχεται ολόκληρο το θεωρητικό υπόβαθρο της κλασικής ηλεκτροδυναμικής, όταν αυτές συνδυαστούν με τον νόμο της δύναμης Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1.5)$$

όπου q είναι το ηλεκτρικό φορτίο ενός σωματιδίου, \vec{v} η ταχύτητά του και \vec{F} η δύναμη που ασκείται σε αυτό όταν βρεθεί μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ορίζουν τα \vec{E} και \vec{B} . Μέσω των εξισώσεών του ο Maxwell ενοποίησε τον ηλεκτρισμό με τον μαγνητισμό, ενώ

ταυτόχρονα προέβλεψε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ότι αυτά μπορούν να διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός, γεγονός που του προκάλεσε την υποψία πως το φως είναι και αυτό ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η κυματική εξίσωση που προκύπτει από τις εξισώσεις του Maxwell είναι:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (1.6)$$

για το ηλεκτρικό πεδίο, ενώ για το μαγνητικό πεδίο η κυματική εξίσωση είναι αντίστοιχα:

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}. \quad (1.7)$$

Στις κυματικές αυτές εξισώσεις, η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται ίση με την ταχύτητα του φωτός, c :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458 \text{ m/s} = c. \quad (1.8)$$

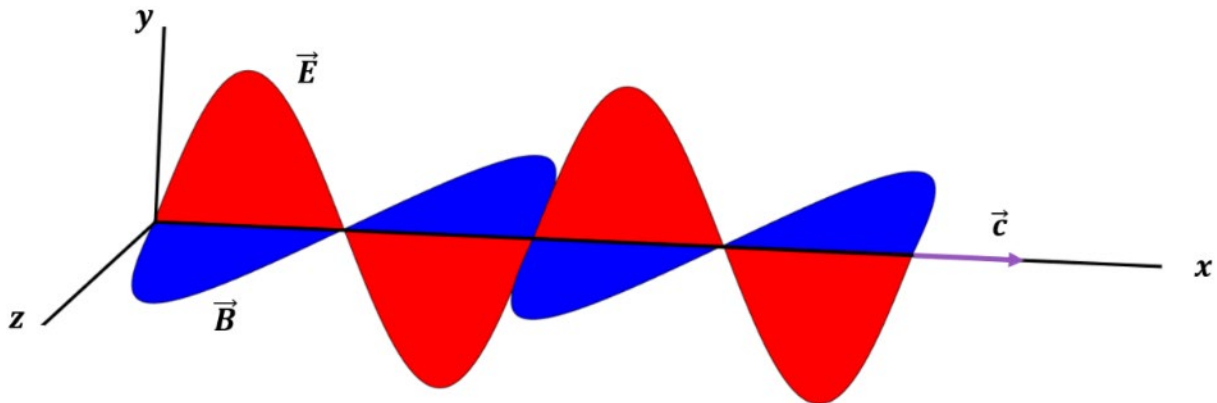
Για επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δηλαδή εκείνα των οποίων τα πεδία είναι ομοιόμορφα πάνω σε κάθε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης, οι απλούστερες λύσεις των εξισώσεων (1.6) και (1.7) είναι αυτές των ημιτονοειδών κυμάτων:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta) \hat{n} \quad (1.9)$$

και

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = B_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta) (\hat{k} \times \hat{n}), \quad (1.10)$$

όπου E_0 και B_0 είναι το πλάτος του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα, \hat{n} το διάνυσμα πόλωσης το οποίο κατά σύμβαση αντιστοιχεί στην πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου, \vec{k} το διάνυσμα διάδοσης του κύματος το μέτρο του οποίου είναι ο κυματαριθμός k , ω η κυκλική συχνότητα και δ η φάση του κύματος [2]. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος έχουν πάντα την ίδια φάση και είναι κάθετα μεταξύ τους, όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (1.9) και (1.10). Η συμπεριφορά αυτή του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου φαίνεται και στο Σχήμα 1.1 που ακολουθεί, όπου απεικονίζεται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

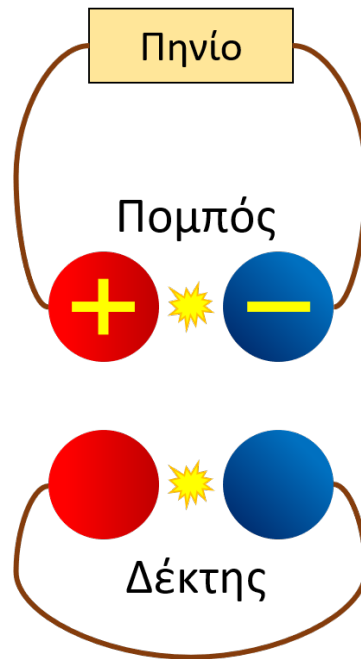


Σχήμα 1.1: Απεικόνιση ενός επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται στη θετική κατεύθυνση του άξονα x .

Σε κάθε χρονική στιγμή το ηλεκτρικό αλλά και το μαγνητικό πεδίο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ικανοποιούν την εξής σχέση:

$$\frac{E}{B} = c. \quad (2.11)$$

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα επιβεβαιώθηκαν πειραματικά το 1886 από τον Γερμανό φυσικό Heinrich Rudolf Hertz. Ο Hertz, προσπαθώντας να ελέγξει την ορθότητα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell, κατασκεύασε μια πειραματική διάταξη η οποία αποτελούνταν από έναν πομπό και έναν δέκτη. Στη διάταξη του Hertz, ο πομπός περιλάμβανε δύο σφαιρικά ηλεκτρόδια, με έναν μικρό κενό χώρο να τα διαχωρίζει. Τα δύο ηλεκτρόδια κατέληγαν στις δύο άκρες ενός πηνίου. Σε μια τέτοια διάταξη, μέσω του πηνίου το ένα ηλεκτρόδιο φορτίζεται θετικά, ενώ το άλλο αρνητικά. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο κοντά σε κάποιο από τα ηλεκτρόδια ξεπεράσει τη διηλεκτρική αντοχή του αέρα (3×10^6 V/m), τότε ο αέρας γίνεται αγώγιμος και δημιουργούνται σπίθες στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Τα ταλαντευόμενα ελεύθερα ηλεκτρόνια του κυκλώματος ακτινοβολούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο πομπός του Hertz είναι στην πράξη ένα κύκλωμα LC με αυτεπαγωγή αυτήν του πηνίου και χωρητικότητα που προκύπτει από τα σφαιρικά ηλεκτρόδια. Με τον πομπό αυτό, ο Hertz παρήγαγε ραδιοκύματα συχνότητας της τάξης των 100 MHz, και αποτέλεσε τον πρώτο άνθρωπο που κατάφερε την εκπομπή τους. Σε απόσταση μερικών μέτρων από τον πομπό ο Hertz τοποθέτησε έναν δέκτη, τον οποίο σχημάτισε με τα δύο άκρα ενός καλωδίου διαχωριζόμενα και πάλι από έναν μικρό κενό χώρο. Με κατάλληλη προσαρμογή ο δέκτης μπορούσε να λάβει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παρήγαγε ο πομπός, και στον κενό χώρο του παράγονταν σπίθες. Μια σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποίησε ο Hertz για το παραπάνω πείραμα φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του Hertz για την παραγωγή και την ανίχνευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Στα επόμενα τρία χρόνια, ο Hertz διεξήγαγε επιπλέον πειράματα, με τα οποία απέδειξε πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να ανακλαστούν και να διαθλαστούν, μέτρησε επίσης την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, την πόλωση, αλλά και την ταχύτητά τους, την οποία και βρήκε ίση με την ταχύτητα του φωτός. Με τα πειράματά του, επιβεβαιώθηκε πλήρως η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell και αποδείχθηκε πως τα ραδιοκύματα και το φως ανήκουν στην ίδια οικογένεια, η οποία σήμερα αποκαλείται ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [3,4].

1.2 Εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραιές

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια και ορμή. Ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα περιγράφεται από το διάνυσμα Poynting το οποίο ορίζεται ως:

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}. \quad (1.12)$$

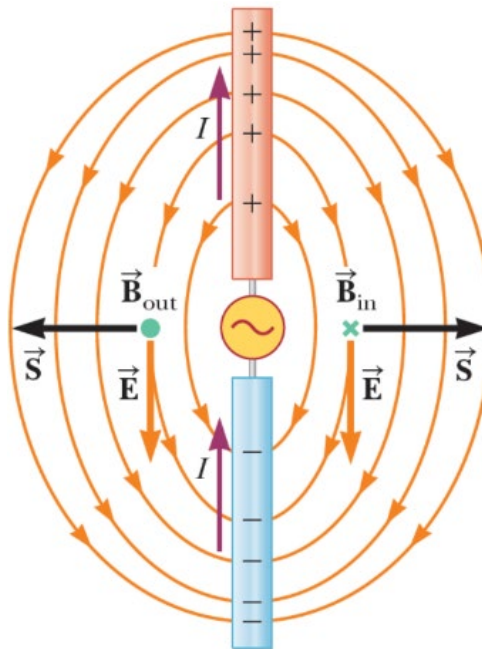
Το μέτρο του διανύσματος Poynting εκφράζει τον ρυθμό ροής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και η μονάδα μέτρησής του είναι Watt/m^2 . Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (1.12), η κατεύθυνση του διανύσματος Poynting είναι ίδια με την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Η ενέργεια απελευθερώνεται με την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από φορτία. Ένα φορτίο το οποίο δεν κινείται δημιουργεί μόνο ένα ηλεκτρικό πεδίο, ενώ ένα φορτίο κινούμενο με σταθερή ταχύτητα δημιουργεί επιπλέον και ένα μαγνητικό πεδίο.

1.2 Εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραίες

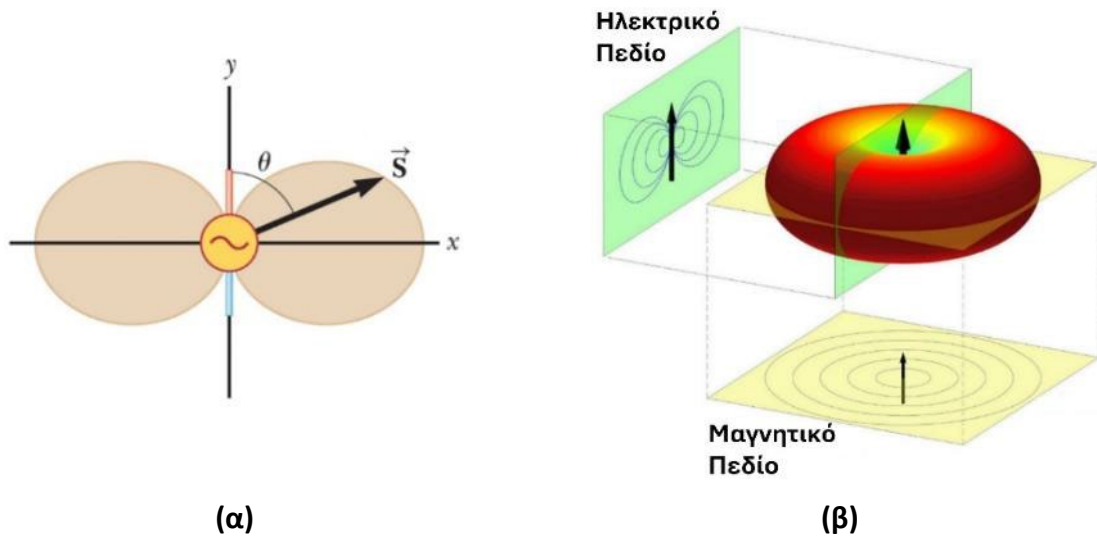
Επιπρόσθετα, φορτία τα οποία επιταχύνονται ή επιβραδύνονται, εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτό, ένα σύρμα το οποίο διαρρέεται από κάποιο χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Στην περίπτωση μιας κεραίας ημικύματος, επίσης γνωστή και ως διπολική κεραία, δύο αγώγιμες ράβδοι, η κάθε μια μήκους ίσου με το ένα τέταρτο από το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, συνδέονται σε μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Η εναλλαγή της τάσης εξαναγκάζει τα φορτία να ταλαντώνονται μεταξύ των δύο ράβδων. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο σε μια τυχαία χρονική στιγμή.



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου (\vec{E}) και του μαγνητικού πεδίου (\vec{B}), στην περίπτωση μιας αυθαίρετης χρονικής στιγμής, κατά την εκπομπή από μια κεραία ημικύματος.

Ο λόγος που η κεραία αυτή αποκαλείται και διπολική είναι ότι καθώς τα φορτία διαχωρίζονται μεταξύ των δύο ράβδων, οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου συμπεριφέρονται όπως εκείνες ενός διπόλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Επομένως, καθώς τα φορτία ταλαντώνονται συνεχώς, η κεραία μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα ηλεκτρικό δίπολο σε ταλάντωση. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους γύρω από τις ράβδους και είναι κάθετες σε κάθε σημείο των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου. Η κατεύθυνση του διανύσματος Poynting δείχνει την κατεύθυνση ροής ενέργειας και τη χρονική στιγμή που απεικονίζεται στο σχήμα 1.3, φαίνεται πως ενέργεια απομακρύνεται από την κεραία. Με ανάλυση των εξισώσεων του Maxwell, προκύπτει πως η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη γωνία θ μεταξύ του διανύσματος Poynting και της κεραίας κατά έναν παράγοντα $(\sin^2 \theta)/r^2$. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται η γωνιακή εξάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας που παράγεται από μια διπολική κεραία.



Σχήμα 1.4: Απεικόνιση της γωνιακής εξάρτησης της έντασης της ακτινοβολίας που παράγεται από ένα δίπολο, σε ένα **(α)** δυοδιάστατο και ένα **(β)** τρισδιάστατο διάγραμμα.

Η αντίστροφη διαδικασία συμβαίνει όταν μια κεραία λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το προσπίπτον στην κεραία κύμα προκαλεί ένα εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Καθώς το μήκος της κεραίας ισούται με το μισό από το μήκος κύματος, η τάση και το ρεύμα δημιουργούν σε αυτήν ένα στάσιμο κύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα λαμβάνεται μέσω της γραμμής μεταφοράς της κεραίας καταλήγοντας σε έναν δέκτη. Η ανταπόκριση της κεραίας είναι μέγιστη όταν ο άξονάς της είναι παράλληλος στο ηλεκτρικό πεδίο και μηδενική όταν είναι κάθετος σε αυτό [3,5].

1.3 Βασικές παράμετροι των κεραιών

Για την περιγραφή μιας κεραίας χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι. Αρκετές συνδέονται μεταξύ τους και έτσι δεν είναι απαραίτητη η γνώση κάθε μιας από αυτές. Μερικές από τις βασικότερες παραμέτρους μιας κεραίας περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

1.3.1 Εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης μιας κεραίας, είναι ένα εύρος συχνοτήτων, μέσα στο οποίο η κεραία λειτουργεί αποδοτικά, σύμφωνα με κάποιο αναμενόμενο πρότυπο. Συνήθως, το εύρος ζώνης περιλαμβάνει μια κεντρική συχνότητα για την οποία η κεραία εμφανίζει τη μέγιστη αποδοτικότητά της, καθώς και μια περιοχή συχνοτήτων γύρω από την κεντρική, στην οποία μολονότι η αποδοτικότητα της κεραίας φθίνει, παραμένει εντός κάποιων επιτρεπτών ορίων. Στις ευρυζωνικές κεραιές, το εύρος ζώνης εκφράζεται συνήθως ως ένας λόγος, όπως για παράδειγμα 5:1, που εκφράζει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η ανώτερη συχνότητα σε σχέση με τη κατώτερη. Για κεραιές στενής ζώνης, συνήθως το εύρος ζώνης εκφράζεται ως ένα

ποσοστό που δηλώνει πόσο απέχουν οι συχνότητες των άκρων από την κεντρική συχνότητα του εύρους ζώνης [6].

1.3.2 Κατευθυντικότητα

Η κατευθυντικότητα μιας κεραιάς ορίζεται ως ο λόγος της έντασης της ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, ως προς τη μέση ένταση της ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις. Η μέση ένταση της ακτινοβολίας ισούται με τη συνολική ακτινοβολούμενη ισχύ της κεραιάς, διαιρεμένη δια του 4π . Όταν δεν ορίζεται κάποια κατεύθυνση, τότε η κατευθυντικότητα εκφράζεται ως προς την κατεύθυνση με τη μέγιστη ακτινοβολούμενη ισχύ. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κατευθυντικότητα υπολογίζεται από τη σχέση

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}}, \quad (1.13)$$

όπου D είναι η κατευθυντικότητα και αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος, U η ένταση ακτινοβολίας εκφρασμένη σε Watt ανά μονάδα στερεάς γωνίας και P_{rad} η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς εκφρασμένη σε Watt [6].

1.3.3 Αποδοτικότητα

Η αποδοτικότητα της κεραιάς είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται για να εκφράσει κατά πόσο έχουν υπάρξει απώλειες τόσο στην είσοδο της κεραιάς, όσο και στο εσωτερικό αυτής. Μεγαλύτερη αποδοτικότητα σημαίνει και μεγαλύτερο ποσοστό εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από εκείνη που αρχικά εισήλθε στην κεραιά. Η αποδοτικότητα ελαττώνεται όταν αυξάνονται οι απώλειες. Στην κεραιά εμφανίζονται απώλειες που οφείλονται στις ανακλάσεις που προκαλούνται στις γραμμές μεταφοράς λόγω της μη ιδανικής σύνδεσης με την κεραιά, καθώς και στις ωμικές και τις διηλεκτρικές απώλειες. Για τα τρία αυτά είδη απωλειών ορίζονται αντίστοιχα τρεις συντελεστές, οι e_r , e_c και e_d , οι οποίοι αποτελούν αδιάστατα μεγέθη, όπως και η συνολική αποδοτικότητα της κεραιάς. Σύμφωνα με τους συντελεστές αυτούς η αποδοτικότητα μιας κεραιά μπορεί γενικά να γραφτεί ως:

$$e_0 = e_r e_c e_d, \quad (1.14)$$

όπου e_0 είναι η συνολική αποδοτικότητα της κεραιάς, e_r ο συντελεστής απόδοσης λόγω ανακλάσεων, e_c ο συντελεστής απόδοσης λόγω ωμικών απωλειών και e_d ο συντελεστής απόδοσης λόγω διηλεκτρικών απωλειών. Οι συντελεστές e_c και e_d είναι συνήθως δύσκολο να υπολογιστούν, όμως μπορούν να βρεθούν πειραματικά. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση αυτή, δεν μπορούν να γίνουν γνωστοί μεμονωμένα ο ένας από τον άλλο. Για τον λόγο αυτόν πολλές φορές εμπεριέχονται σε έναν κοινό συντελεστή, τον $e_{cd} = e_c e_d$. Ο συντελεστής e_r προκύπτει από τη σχέση:

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2, \quad (1.15)$$

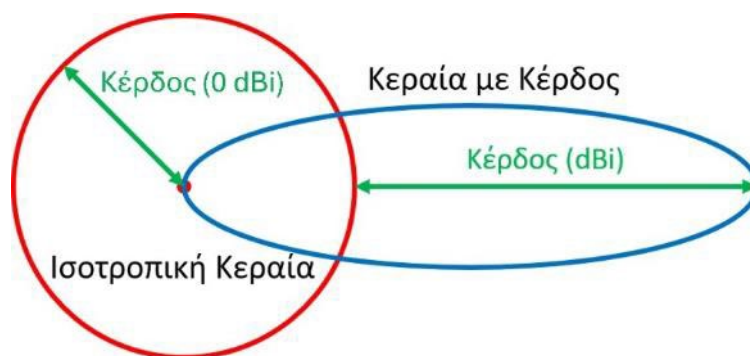
όπου Γ είναι ο συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας για τον οποίο ισχύει:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}, \quad (1.16)$$

όπου Z_{in} είναι η εμπέδηση της εισόδου της κεραίας και Z_0 η εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς. Ο συντελεστής Γ αναφέρεται πολύ συχνά ως παράμετρος S11.

1.3.4 Κέρδος

Ως κέρδος της κεραίας ορίζεται ο λόγος της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει η κεραία, ως προς την ακτινοβολία που θα εξέπεμπε μια ιστροπική κεραία. Η ιστροπική είναι μια θεωρητική κεραία, που εκπέμπει ακτινοβολία ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η μονάδα μέτρησης του κέρδους είναι το dBi (decibels relative to isotropic). Η ιστροπική κεραία έχει κέρδος 0 dBi [7]. Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται ποιοτικά η κατανομή της ακτινοβολίας μιας κεραίας με κέρδος μεγαλύτερο του μηδενός, ως προς αυτήν μιας ιστροπικής κεραίας.



Σχήμα 1.5: Απλοποιημένη απεικόνιση της κατανομής της ακτινοβολίας μιας κεραίας με κέρδος μεγαλύτερο του μηδενός, ως προς αυτήν μιας ιστροπικής κεραίας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κέρδος δίνεται από τη σχέση:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}}, \quad (1.17)$$

όπου G είναι το κέρδος, U η ένταση ακτινοβολίας εκφρασμένη σε Watt ανά μονάδα στερεάς γωνίας και P_{in} η ισχύς που εισέρχεται στην είσοδο της κεραίας. Το κέρδος ορίζεται ώστε να μην περιλαμβάνει απώλειες λόγω ανακλάσεων και έτσι στον υπολογισμό του μπορεί να θεωρηθεί πως η ακτινοβολούμενη ισχύς (P_{rad}) συνδέεται με την ισχύ εισόδου (P_{in}) μέσω του συντελεστή αποδοτικότητας e_{cd} , σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{rad} = e_{cd}P_{in}. \quad (1.18)$$

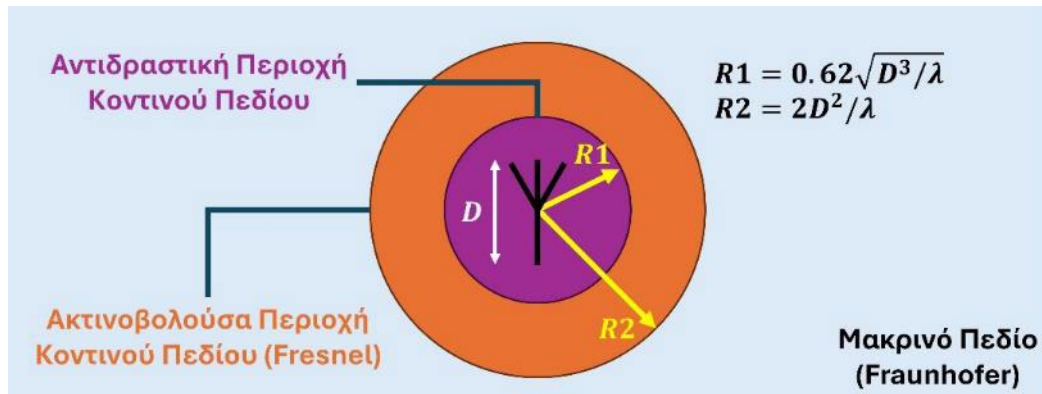
Συνδυάζοντας αυτήν τη σχέση με την (1.17), προκύπτει η εξής σχέση μεταξύ κέρδους και κατευθυντικότητας:

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd}D(\theta, \varphi). \quad (1.19)$$

Επομένως, το κέρδος διαφέρει από την κατευθυντικότητα μόνο ως προς τον συντελεστή αποδοτικότητας e_{cd} [6].

1.3.5 Περιοχές Πεδίου

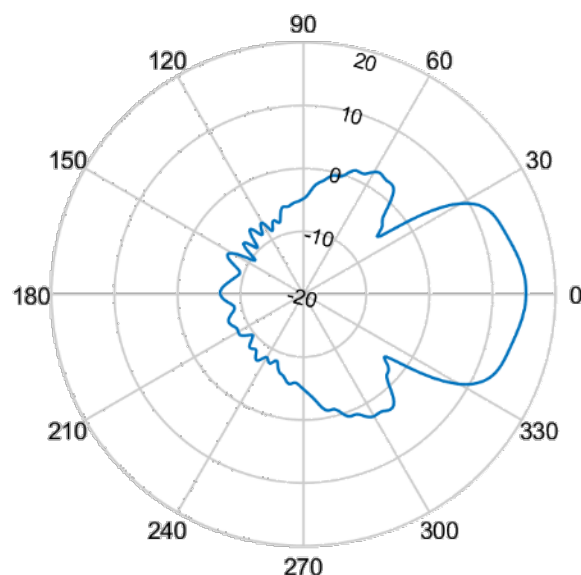
Ο χώρος γύρω από μία κεραία διαιρείται σε δύο βασικές περιοχές, την περιοχή του κοντινού πεδίου (Near Field) και την περιοχή του μακρινού πεδίου (Far Field) ή περιοχή Fraunhofer. Η περιοχή του κοντινού πεδίου χαρακτηρίζεται από μια γενικά απρόβλεπτη συμπεριφορά των πεδίων και διαιρείται σε δύο επιμέρους περιοχές, την αντιδραστική περιοχή του κοντινού πεδίου (Reactive Near-Field Region) και την ακτινοβολούσα περιοχή του κοντινού πεδίου (Radiating Near-Field Region) ή περιοχή Fresnel. Η αντιδραστική περιοχή του κοντινού πεδίου, συνήθως ορίζεται ως η περιοχή εκείνη για την οποία ισχύει η σχέση $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$, όπου R είναι η απόσταση από την κεραία, D η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας και λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Στην περιοχή αυτή τα πεδία, κατά κύρια βάση, βρίσκονται 90° εκτός φάσης και καλούνται αντιδραστικά. Για τη διάδοση του κύματος, είναι απαραίτητο τα πεδία να είναι κάθετα μεταξύ τους, αλλά και να έχουν διαφορά φάσης 0. Η ακτινοβολούσα περιοχή του κοντινού πεδίου καλύπτει το εύρος εκείνο στο οποίο για την απόσταση R από την κεραία ισχύει $0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2D^2/\lambda$. Στην περιοχή αυτή, το πεδίο ακτινοβολίας, εκείνο δηλαδή για το οποίο το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο βρίσκονται σε διαφορά φάσης 0, υπερισχύει του αντιδραστικού πεδίου, ωστόσο δεν έχει λάβει ακόμα μορφή που να μπορεί να προσεγγιστεί με αυτήν ενός επίπεδου κύματος. Εάν η μεγαλύτερη διάσταση μιας κεραίας είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος, η ακτινοβολούσα περιοχή του κοντινού πεδίου μπορεί να μην υπάρχει. Η περιοχή του μακρινού πεδίου καλύπτει κάθε απόσταση R από την κεραία για την οποία ισχύει $R \geq 2D^2/\lambda$. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι πλέον κάθετα μεταξύ τους και συμφασικά [6]. Στο Σχήμα 1.6 που ακολουθεί φαίνονται σχηματικά οι περιοχές πεδίου.



Σχήμα 1.6: Οι περιοχές πεδίου γύρω από μια κεραία.

1.3.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Σημαντικές πληροφορίες για τη λειτουργία μιας κεραίας, εμπεριέχονται στο διάγραμμα ακτινοβολίας της. Το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι μια γραφική απεικόνιση που περιλαμβάνει την ένταση της εκπεμπόμενης από την κεραία ακτινοβολίας, συναρτήσει των χωρικών συντεταγμένων γύρω από την κεραία. Αναφέρεται πάντοτε σε αποστάσεις που αντιστοιχούν στο μακρινό πεδίο της κεραίας. Για την κατασκευή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας κεραίας, συνήθως η κεραία διατηρείται σταθερή, και μια δεύτερη κεραία τοποθετείται σε κάποια σταθερή απόσταση από την πρώτη. Η κεραία της οποίας είναι επιθυμητή η σχεδίαση του διαγράμματος ακτινοβολίας περιστρέφεται, και καταγράφεται η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ως προς τη γωνία. Η ένταση της ακτινοβολίας ως προς κάθε γωνία, εμφανίζεται στο διάγραμμα ακτινοβολίας εκφρασμένη σε dBi [7]. Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται ένα παράδειγμα του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας κεραίας.



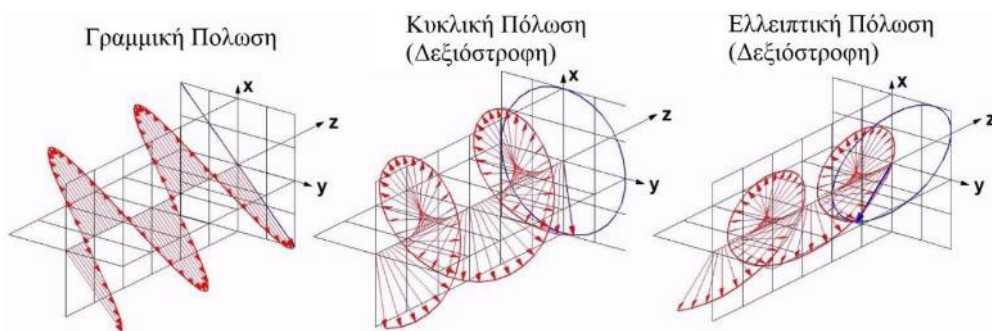
Σχήμα 1.7: Απεικόνιση της μορφής του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας κεραίας.

1.3.7 Πόλωση

Η πόλωση μιας κεραιάς σε κάποια ορισμένη κατεύθυνση ορίζεται ως η πόλωση του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αν η κατεύθυνση δεν είναι καθορισμένη, τότε η πόλωση θεωρείται πως είναι εκείνη που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση προς την οποία η ακτινοβολία που εκπέμπει η κεραία είναι μέγιστη. Μπορεί να μεταβάλλεται για διαφορετικά σημεία γύρω από την κεραία. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου, η πόλωση κατηγοριοποιείται στις εξής τρεις μορφές:

- Γραμμική πόλωση: Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι γραμμικά πολωμένο, όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου βρίσκεται, για κάθε χρονική στιγμή, πάνω στην ίδια ευθεία.
- Κυκλική πόλωση: Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι κυκλικά πολωμένο, όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου διαγράφει μια κυκλική τροχιά.
- Ελλειπτική πόλωση: Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ελλειπτικά πολωμένο, όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου διαγράφει μια ελλειπτική τροχιά.

Ανάλογα με τη φορά περιστροφής του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου, διακρίνονται δύο είδη κυκλικής και ελλειπτικής πόλωσης, η δεξιόστροφη, όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, και η αριστερόστροφη, όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται με φορά αντίθετη από αυτήν των δεικτών του ρολογιού. Στην πράξη, η γραμμική και η κυκλική πόλωση είναι ειδικές περιπτώσεις της ελλειπτικής πόλωσης, που προκύπτουν όταν η έλλειψη γίνεται ευθεία ή κύκλος αντίστοιχα. Όταν μια κεραία χρησιμοποιείται για να λάβει κάποιο σήμα, για την καταγραφή της μέγιστης δυνατής ισχύος πρέπει να είναι τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο, ώστε η πόλωσή της να συμπίπτει με εκείνη του λαμβανόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος [8]. Στο σχήμα 1.8 απεικονίζονται οι τρεις μορφές πόλωσης.



Σχήμα 1.8: Απεικόνιση ενός γραμμικά πολωμένου κύματος (αριστερά), ενός κυκλικά πολωμένου (κέντρο) και ενός ελλειπτικά πολωμένου (δεξιά).

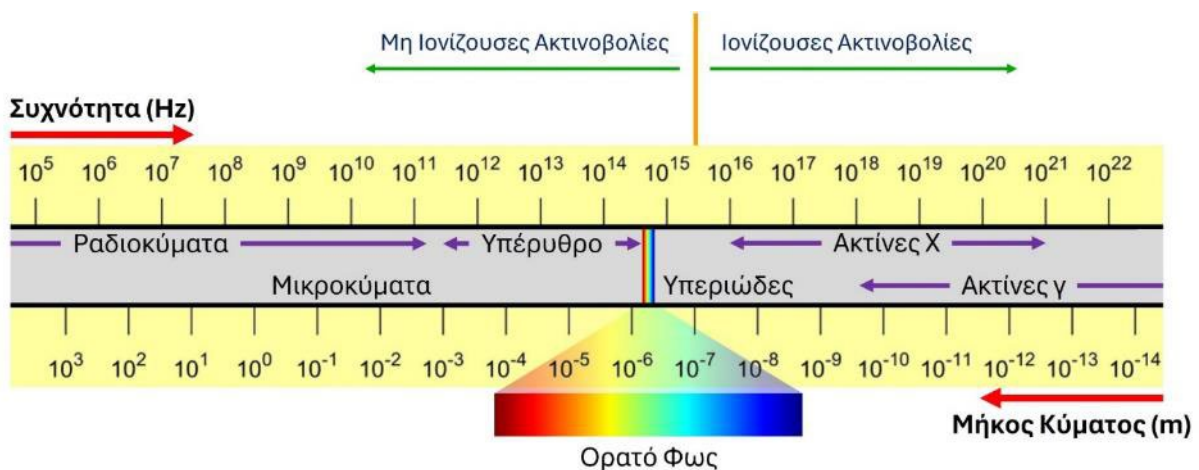
1.4 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα συνεχές φάσμα συχνοτήτων και μηκών κύματος, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαιρείται σε διάφορες περιοχές που εμπεριέχουν διαφορετικά είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και είναι οργανωμένες σύμφωνα με τα μήκη κύματος και τις συχνότητές τους, με τα όρια της μετάβασης από τη μια περιοχή στην άλλη να μην είναι αυστηρά καθορισμένα. Οι περιοχές που συγκροτούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι, από τις μικρότερες συχνότητες προς τις μεγαλύτερες, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, το ορατό φως, η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες Χ και οι ακτίνες γ. Η κάθε μια περιοχή κατακερματίζεται σε περεταιίρω ζώνες.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια και, ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων, διαιρείται σε δύο είδη, την ιονίζουσα και τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Η ιονίζουσα ακτινοβολία μεταφέρει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσει τον ιονισμό ατόμων ή μορίων, αποσπώντας ηλεκτρόνια από αυτά και είναι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία καθώς μπορεί, μεταξύ άλλων, να προκαλέσει αλλοίωση του DNA και κατά συνέπεια την εμφάνιση καρκίνου. Η μη ιονίζουσα ακτινοβολία δε μεταφέρει αρκετή ενέργεια για να προκαλέσει ιονισμό. Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας ν , και επομένως αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος λ , της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και δίνεται από τη σχέση:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \tag{1.20}$$

όπου h η σταθερά του Planck. Ως ιονίζουσες ακτινοβολίες θεωρούνται οι ακτίνες γ, οι ακτίνες Χ καθώς και μια περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας [9,10]. Μια απεικόνιση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος φαίνεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

1.5 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον χώρο βασίζεται σε πολλούς μηχανισμούς, με τους βασικότερους να είναι η ανάκλαση, η διάθλαση, η περίθλαση και η σκέδαση. Η ανάκλαση συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια μεγάλων διαστάσεων σε σχέση με το μήκος κύματος, όπως μπορεί να είναι ένας τοίχος ή το έδαφος. Ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται προς το αρχικό μέσο διάδοσης, ενώ ένα άλλο διαθλάται στο δεύτερο μέσο όπου προσπίπτει το κύμα. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση το μέσο πρόσπτωσης να είναι ένας τέλειος αγωγός, όπου τότε η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα πεδία επιστρέφει εξ' ολοκλήρου στο αρχικό μέσο διάδοσης, καθώς και η περίπτωση η γωνία πρόσπτωσης να λαμβάνει την κρίσιμη τιμή της γωνίας Brewster, όπου δεν εμφανίζεται ανάκλαση. Η περίθλαση συμβαίνει κατά την πρόσπτωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε κάποιο εμπόδιο η σχισμή που παρεμβάλλεται στη διαδρομή του, και οι διαστάσεις του οποίου είναι της τάξης του μήκους κύματος. Βασίζεται στην αρχή του Huygen σύμφωνα με την οποία κάθε σημείο του μετώπου του κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως μια σημειακή πηγή που παράγει δευτερεύοντα μέτωπα. Κάποια από αυτά τα μέτωπα διαδίδονται πίσω από την επιφάνεια πρόσπτωσης του κύματος. Η σκέδαση συμβαίνει όταν στο μέσο διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος παρεμβάλλεται ένα μεγάλο πλήθος αντικειμένων οι διαστάσεις των οποίων είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος. Κατά την πρόσπτωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα τέτοιο εμπόδιο, η ανακλώμενη ενέργεια διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις [11].

Η ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που λαμβάνεται από κάποια κεραία μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή της, ακόμα και αν το μέσο διάδοσης είναι το κενό, καθώς το μέτωπο του κύματος επεκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις και κατά συνέπεια η πυκνότητα ροής ακτινοβολίας φθίνει. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα που επιχειρούν να προβλέψουν τον βαθμό της εξασθένησης στην οποία υπόκεινται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καθώς οδεύουν στον χώρο. Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι αυτό της εξασθένησης διαδρομής του ελεύθερου χώρου (Free Space Path Loss, FSPL), που αναπτύχθηκε από τον Friis [12]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η εκπεμπόμενη και η λαμβανόμενη ισχύς συνδέονται με τη σχέση:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad (1.21)$$

όπου P_r είναι η λαμβανόμενη ισχύς από τον δέκτη, P_t η εκπεμπόμενη ισχύς από τον πομπό, G_r και G_t είναι το κέρδος της κεραίας του δέκτη και του πομπού αντίστοιχα εκφρασμένα ως καθαροί αριθμοί, λ το μήκος κύματος και d η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Σύμφωνα με τη σχέση (1.21), η εξασθένηση εκφρασμένη σε dB δίνεται από τη σχέση:

$$PL = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] - G_r - G_t, \quad (1.22)$$

όπου η εξασθένηση PL (Path Loss) εκφράζεται σε dB, και τα κέρδη G_t και G_r εκφράζονται σε dBi. Το μοντέλο θεωρεί πως το μέσο διάδοσης είναι το κενό, καθώς και ότι ο δέκτης βρίσκεται στο μακρινό πεδίο του πομπού, όπου το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσεγγίζει ένα επίπεδο κύμα. Επίσης, στο μοντέλο θεωρείται πως οι κεραιές του πομπού και του δέκτη είναι ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους και έχουν την ίδια πόλωση, και γενικά θεωρείται πως δεν υπάρχουν άλλες απώλειες [13].

1.6 Μικροκύματα

Μικροκύματα θεωρούνται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή συχνοτήτων περίπου από 1 έως 300 GHz, με μήκη κύματος από 30 έως 0.1 cm αντίστοιχα. Τα μικροκύματα βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλα πεδία. Το πλήθος των εφαρμογών τους άρχισε να αυξάνεται ραγδαία ξεκινώντας από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, όταν αναπτύχθηκε η πρώτη μεγάλη εφαρμογή των μικροκυμάτων, το ραντάρ. Σήμερα χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στις τηλεπικοινωνίες και ιδιαίτερα στις δορυφορικές επικοινωνίες, καθώς επίσης και στα ραντάρ, στα συστήματα πλοήγησης, στα κινητά τηλέφωνα, στην αστρονομία, στην ιατρική, στους επιταχυντές σωματιδίων, στη φασματοσκοπία και σε πολλά ακόμα πεδία.

Τα μικροκύματα διαδίδονται ευθύγραμμα από τις πηγές τους και δεν ανακλώνται από την ιονόσφαιρα. Οι μεγάλες τους συχνότητες επιτρέπουν τη χρήση κεραιών μικρότερων διαστάσεων και μεγαλύτερου κέρδους. Επίσης, υποστηρίζουν μεγάλο εύρος ζώνης παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα μεταφοράς μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας, και κατά συνέπεια υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων [14,15].

Έχουν οριστεί διάφορες περιοχές συχνοτήτων στο εσωτερικό του φάσματος των μικροκυμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1. Η ταξινόμηση αυτή έχει οριστεί στο πρότυπο IEEE 521-2002 του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) [16]. Η ταξινόμηση που ορίζεται στο πρότυπο αυτό δεν είναι η μοναδική που χρησιμοποιείται.

Πίνακας 1.1: Ονομασίες των περιοχών που συγκροτούν το φάσμα των μικροκυμάτων, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 521-2002.

Σύμβολο Περιοχής	Συχνότητες (GHz)	Μήκη Κύματος (cm)
L	1 - 2	30 - 15
S	2 - 4	15 - 7.50
C	4 - 8	7.50 - 3.75
X	8 - 12	3.75 - 2.50
Ku	12 - 18	2.50 - 1.67
K	18 - 27	1.67 - 1.11
Ka	27 - 40	1.11 - 0.75
V	40 - 75	0.75 - 0.40
W	75 - 110	0.40 - 0.27
mm	110 - 300	0.27 - 0.10

1.7 Εξασθένηση μικροκυμάτων λόγω της βροχής

Τα μικροκύματα παρουσιάζουν έντονη εξασθένηση λόγω της βροχής. Τα κύρια αίτια της εξασθένησης των μικροκυμάτων είναι η σκέδαση και η απορρόφηση από τις σταγόνες βροχής. Ένα μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος κύματος σε μια σταγόνα απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο σκεδάζεται, δηλαδή επανεκπέμπεται προς διάφορες κατευθύνσεις.

Για τον προσδιορισμό της απορροφητικότητας του νερού, χρησιμοποιείται ο συντελεστής απορρόφησης, a , οι μονάδες του οποίου είναι m^{-1} . Η ενέργεια που απορροφάται από έναν στοιχειώδη όγκο νερού, dP/dV , εξαρτάται από τον συντελεστή απορρόφησης και από την εισερχόμενη από κάθε κατεύθυνση ακτινοβολία σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\frac{dP}{dV} = a E_0, \quad (1.23)$$

όπου E_0 είναι η συνολική ακτινοβολία στο σημείο αναφοράς. Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης εξαρτάται από το μέσο και μεταβάλλεται με το μήκος κύματος. Μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\alpha = -\frac{1}{r} \ln \frac{L_r}{L_0}, \quad (1.24)$$

όπου r είναι η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στο αναφερόμενο μέσο, και L_0, L_r είναι η τιμή της ακτινοβολίας πριν διασχίσει την απόσταση r , και αφού τη διασχίσει αντίστοιχα. Στην περίπτωση του νερού, ο συντελεστής απορρόφησης συνήθως αναγράφεται ως α_w [17,18].

Ο βαθμός απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την ύλη μπορεί να εξαχθεί από το φάσμα απορρόφησης του κάθε ατόμου ή μορίου. Τα φάσματα απορρόφησης καθορίζονται από τις ενεργειακές μεταβάσεις των ατόμων και μορίων, οι οποίες οφείλονται στην απορρόφηση φωτονίων. Η συνολική ενέργεια ενός ελεύθερου μορίου $E_M(\Lambda, \nu, J)$, αποτελείται από τη μεταφορική ενέργεια E_{TR} , την ενέργεια περιστροφής γύρω από τους άξονες συμμετρίας του μορίου $E_{ROT}(J)$, τη δονητική ενέργεια των ατόμων γύρω από τη θέση ισορροπίας $E_{VIB}(\nu)$, και την ενέργεια των ηλεκτρονίων $E_E(\Lambda)$. Δίνεται επομένως από τη σχέση:

$$E_M(\Lambda, \nu, J) = E_E(\Lambda) + E_{VIB}(\nu) + E_{ROT}(J) + E_{TR}. \quad (1.25)$$

Η ενέργεια $E_E(\Lambda)$ εξαρτάται από τον κβαντικό αριθμό Λ , ο οποίος καθορίζει τη συνιστώσα της ολικής τροχιακής στροφορμής κατά τον μοριακό άξονα. Η ενέργεια $E_{VIB}(\nu)$ εξαρτάται από τον δονητικό κβαντικό αριθμό ν . Η ενέργεια $E_{ROT}(J)$ εξαρτάται από τον κβαντικό αριθμό J , που καθορίζει την ολική τροχιακή στροφορμή. Επομένως, οι τρεις αυτές ενέργειες λαμβάνουν διακριτές τιμές, καθώς εξαρτώνται από τον βαθμό διέγερσης του μορίου.

Η απορρόφηση ή η εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας $E_{hv} = h\nu$ από ένα μόριο προκαλεί τη μετάβασή του από μια αρχική κβαντική κατάσταση αριθμών Λ, ν, J , σε μια κβαντική

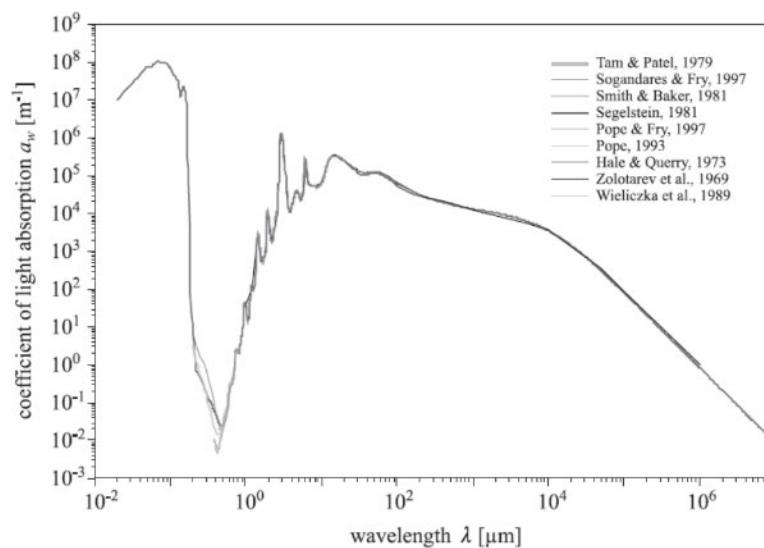
κατάσταση που περιγράφεται από τους νέους κβαντικούς αριθμούς Λ', ν', J' . Έτσι η ενέργεια του απορροφημένου ή εκπεμπόμενου φωτονίου ισούται με την ενεργειακή διαφορά των δύο αυτών καταστάσεων, δηλαδή:

$$E_{h\nu} = E_M(\Lambda, \nu, J) - E_M(\Lambda', \nu', J') = \Delta E_E(\Lambda \rightarrow \Lambda') + \Delta E_{VIB}(\nu \rightarrow \nu') + \Delta E_{ROT}(J \rightarrow J') + \Delta E_{TR}. \quad (1.26)$$

Η αλληλεπίδραση του μορίου του νερού με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητές του. Σε αυτές περιλαμβάνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μορίου, δηλαδή οι θέσεις των ατόμων και των ηλεκτρονίων, καθώς και οι δυναμικές και ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του νερού.

Στην πραγματικότητα, τα μόρια του νερού δεν είναι ελεύθερα, αλλά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας ομάδες μορίων, τα οποία συνδέονται με δεσμούς υδρογόνου. Επομένως, εμφανίζονται πολυμερή του τύπου $(\text{H}_2\text{O})_n$, τα οποία καλούνται συμπλέγματα. Ως αποτέλεσμα, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων επηρεάζουν σημαντικά τη δομή των ενεργειακών τους καταστάσεων. Για τον ίδιο δονητικό κβαντικό αριθμό, προκύπτουν πολλές δονητικές καταστάσεις του μορίου και κατά συνέπεια πολλές διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις. Τα ενεργειακά επίπεδα στα οποία οι καταστάσεις αυτές αντιστοιχούν είναι τόσο κοντά μεταξύ τους, που σχεδόν σχηματίζουν ένα συνεχές φάσμα. Έτσι, το φάσμα απορρόφησης του νερού, στις συμπυκνωμένες φάσεις του (υδρατμοί, υγρό νερό και πάγος), στην πράξη είναι συνεχές, σε αντίθεση με το ελεύθερο μόριο του νερού.

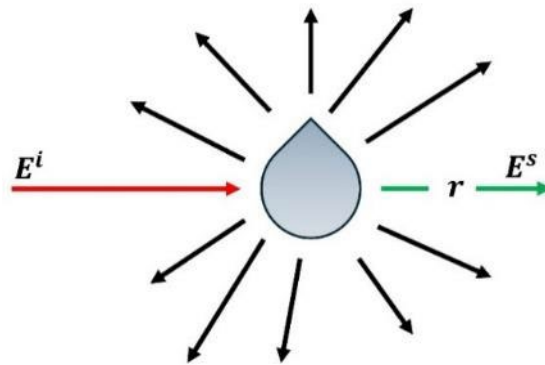
Στη φύση, εμφανίζονται πολλά διαφορετικά ισότοπα του μορίου του νερού, με το επικρατέστερο σε έναν μεγάλο βαθμό να είναι το H_2^{16}O . Το φάσμα απορρόφησης του ισότοπου αυτού, όπως έχει προκύψει από μελέτες διάφορων συγγραφέων φαίνεται στο Σχήμα 1.10 [19–27].



Σχήμα 1.10: Φάσμα απορρόφησης του επικρατέστερου ισότοπου του νερού, H_2^{16}O .

Τα μικροκύματα εμφανίζουν ισχυρή απορρόφηση από το νερό, ιδιαίτερα στην υγρή του φάση. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 2 cm αλληλεπιδρά ισχυρά με τα δίπολα που σχηματίζονται μεταξύ των ατόμων υδρογόνου και οξυγόνου στο μόριο του νερού, λόγω της αυξημένης ηλεκτραρνητικότητας του οξυγόνου ως προς το υδρογόνο. Η ενέργεια της αλληλεπίδρασης καταναλώνεται στη μετατόπιση των διπόλων στο ηλεκτρικό πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού κύματος [17]. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι κατά την αλληλεπίδραση ενός διπόλου με ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα απορροφάται ενέργεια από εκείνες τις συχνότητες που αντιστοιχούν σε περίοδο η οποία προσεγγίζει τον χρόνο ηρέμησης του διπόλου [28]. Ο χρόνος ηρέμησης καθορίζεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων, οι οποίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την πίεση. Οι δονήσεις των μορίων εξασθενούν λόγω της τριβής τους με τα γειτονικά μόρια, διατηρούνται όμως με την απορρόφηση ενέργειας από τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα. Με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται και η απορρόφηση [18].

Ο δεύτερος βασικός μηχανισμός που προκαλεί την εξασθένηση μικροκυμάτων λόγω της βροχής είναι η σκέδαση. Η σκέδαση συμβαίνει όταν στη διαδρομή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος παρεμβάλλονται πολλά εμπόδια, τα οποία είναι μικρά σε σχέση με το μήκος κύματος ή συγκρίσιμα με αυτό. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα σκεδάζεται από μια σταγόνα βροχής τότε επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από αυτήν, όπως φαίνεται και στη σχηματική απεικόνιση στο Σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Γενική σχηματική απεικόνιση της σκέδασης από μια σταγόνα βροχής.

Στο Σχήμα 1.10, ως E^i αναγράφεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του προσπίπτοντος κύματος, ως E^s η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του σκεδασμένου κύματος, και ως r η απόσταση μεταξύ ενός σημείου παρατήρησης και της σταγόνας βροχής. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ενός σκεδασμένου κύματος εξαρτάται από αυτήν του προσπίπτοντος σύμφωνα με τη σχέση:

$$E^s = E^i \cdot f(D) \cdot r^{-1} \cdot e^{jk_0 r}, \quad (1.27)$$

όπου $f(D)$ είναι η συνάρτηση σκέδασης, D είναι η διάμετρος της σταγόνας βροχής, j είναι η φανταστική μονάδα και k_0 είναι ο κυματάρθμος για διάδοση στο κενό. Η διάμετρος μιας σταγόνας κυμαίνεται συνήθως από 0.1 έως 7 mm. Έτσι, ανάλογα με το μήκος κύματος, τα μικροκύματα μπορεί να υπόκεινται σε δύο ειδών σκεδάσεις, τη σκέδαση Rayleigh ή τη σκέδαση Mie. Η σκέδαση Rayleigh αφορά μικροκύματα των οποίων το μήκος κύματος είναι τουλάχιστον μια περίπου τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από τη διάμετρο της σταγόνας βροχής, και η κατανομή της σκεδασμένης ακτινοβολίας είναι ομοιόμορφη προς όλες τις κατευθύνσεις. Όταν το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τη διάμετρο της σταγόνας τότε επικρατεί η σκέδαση Mie, η οποία είναι πιο κατευθυντική από τη σκέδαση Rayleigh, προς την εμπρόσθια κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι, η σκέδαση Rayleigh είναι κυρίαρχη για μικροκύματα συχνότητας έως περίπου 3 GHz, ενώ για ανώτερες συχνότητες κυρίαρχη είναι η σκέδαση Mie. Και στις δύο περιπτώσεις η σκέδαση είναι ελαστική, δηλαδή η συχνότητα της σκεδασμένης ακτινοβολίας παραμένει ίδια με εκείνη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ παράλληλα η συνολική ενέργεια της ακτινοβολίας πριν και μετά τη σκέδαση διατηρείται σταθερή, αν και ανακατευθύνεται προς διάφορες κατευθύνσεις.

Τόσο η ένταση της βροχής, όσο και η εξασθένηση ενός μικροκυματικού σήματος λόγω αυτής, μπορούν να συσχετιστούν με την κατανομή του μεγέθους σταγόνων βροχής (DSD, Drop Size Distribution). Θεωρώντας πως η πυκνότητα του νερού είναι σταθερή, η ένταση της βροχής, εκφρασμένη σε mm/h, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$R(t) = C_R \int_0^{\infty} V(D)v(D)N(D,t)dD, \quad (1.28)$$

όπου $R(t)$ είναι η ένταση της βροχής, $V(D)$ είναι ο όγκος μιας σταγόνας βροχής σε mm^3 , D είναι η διάμετρος της σταγόνας σε mm, $v(D)$ είναι η ταχύτητα πτώσης της σταγόνας σε m/s, και $N(D,t)$ είναι η κατανομή μεγέθους των σταγόνων βροχής, δηλαδή το πλήθος σταγόνων διαμέτρου D ανά m^3 συναρτήσεως του χρόνου, t . Ως C_R αναγράφεται ένας παράγοντας μετατροπής μονάδων, και ισούται με 3.6×10^{-3} [29]. Η ειδική εξασθένηση λόγω της βροχής, εκφρασμένη σε dB/km, δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{h,v} = 8.686 \times 10^3 \frac{2\pi}{k} \text{Im} \int_0^{\infty} f_{h,v}(D)N(D,R)dD, \quad (1.29)$$

όπου $\gamma_{h,v}$ είναι η ειδική εξασθένηση λόγω της βροχής για οριζόντια (h) και κάθετη (v) πόλωση. Στην περίπτωση της σκέδασης Rayleigh η συνάρτηση εμπρόσθιας σκέδασης είναι η:

$$f(D) = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \frac{\pi^2}{\lambda} D^3, \quad (1.30)$$

1.8 Καθιερωμένες τεχνικές μέτρησης της έντασης της βροχής και μια εναλλακτική προσέγγιση μέσω της εξασθένησης σήματος

όπου ε είναι η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά της σταγόνας βροχής. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της σκέδασης Mie η συνάρτηση εμπρόσθιας σκέδασης είναι η:

$$f(D) = \frac{j\lambda^3}{\pi^3 D^2} \left[\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \right]^* , \quad (1.31)$$

όπου τα a_n και b_n είναι οι συντελεστές του Mie οι οποίοι αποτελούνται από συναρτήσεις Bessel τάξης n . Η κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής μπορεί να προσεγγιστεί σε σχέση με την ένταση της βροχής και τη διάμετρο σταγόνας ως [30]:

$$N(D, R) = 8000 \cdot e^{\frac{-4.1D}{R^{0.21}}} . \quad (1.32)$$

Εμπειρικά, η ειδική εξασθένηση και η ένταση της βροχής μπορούν να συσχετιστούν μέσω μιας σχέσης δύναμης της μορφής:

$$\gamma_R = aR^b , \quad (1.33)$$

όπου τα a και b είναι σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από τη συχνότητα καθώς και την κατανομή του μεγέθους σταγόνων βροχής [29,31].

1.8 Καθιερωμένες τεχνικές μέτρησης της έντασης της βροχής και μια εναλλακτική προσέγγιση μέσω της εξασθένησης σήματος

Η μέτρηση της έντασης της βροχής είναι πολύ σημαντική για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Στη μετεωρολογία οι μετρήσεις της βροχής είναι απαραίτητες για τα υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την κατανόηση και την πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών, κάτι που με τη σειρά του συνεισφέρει στην προετοιμασία και τον μετριασμό των επιπτώσεων που μπορεί να έχουν ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως πλημμύρες, τυφώνες κλπ. Η γνώση της έντασης και της κατανομής της βροχής είναι σημαντική και στη γεωργία, καθώς έτσι οι αγρότες μπορούν να προσαρμόζουν κατάλληλα τη χρήση νερού για τις σοδιές τους και να βελτιστοποιήσουν την αποδοτικότητά τους γενικότερα. Ο πολεοδομικός σχεδιασμός βασίζεται επίσης σε ακριβή δεδομένα βροχών για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών συστημάτων αποχέτευσης και τη διαχείριση των όμβριων υδάτων, για τη μείωση του κινδύνου αστικών πλημμυρών. Επιπλέον, μετρήσεις της βροχής είναι αναγκαίες για την υδρολογία και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα των προμηθειών νερού. Συνολικά, η δυνατότητα ακριβούς μέτρησης της έντασης της βροχής είναι κρίσιμη για πολλές πτυχές της περιβαλλοντικής διαχείρισης, της δημόσιας ασφάλειας και της ανάπτυξης υποδομών [32].

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη μέτρηση της έντασης της βροχής, ωστόσο η ακριβής εκτίμηση της παραμένει ένα δύσκολο εγχείρημα, κυρίως λόγω της έντονης χωρικής και χρονικής της μεταβλητότητας και της αδυναμίας υψηλής ακρίβειας μετρήσεων της στο ύψος του εδάφους στην περίπτωση απομακρυσμένων μεθόδων [33,34]. Έτσι, υπάρχει η ανάγκη εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης, οι οποίες να μπορούν να συμπληρώσουν τις υπάρχουσες, για την επίτευξη συνολικά ακριβέστερων εκτιμήσεων. Μια εναλλακτική μέθοδος η οποία έχει αποτελέσει το επίκεντρο αρκετών επιστημονικών μελετών κατά τα τελευταία χρόνια είναι η εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος που προκαλείται λόγω αυτής σε μικροκυματικές ζεύξεις.

1.8.1 Συμβατικές μέθοδοι μέτρησης της έντασης της βροχής

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μέτρηση της έντασης της βροχής περιλαμβάνουν βροχόμετρα και δισδρόμετρα για επιτόπου μετρήσεις, καθώς και ραντάρ καιρού και μετεωρολογικούς δορυφόρους για απομακρυσμένες μετρήσεις. Κάθε μέθοδος προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς [35].

Βροχόμετρα

Τα βροχόμετρα είναι μία από τις παλαιότερες και πιο απλές μεθόδους μέτρησης της έντασης της βροχής. Υπάρχουν διάφοροι τύποι βροχόμετρων, με τα πιο συνηθισμένα να είναι τα τυπικά κυλινδρικά βροχόμετρα και τα βροχόμετρα ανατρεπόμενου κάδου. Ένα τυπικό κυλινδρικό βροχόμετρο συνήθως πρέπει να αδειάζει χειροκίνητα ανά σταθερά χρονικά διαστήματα για τα οποία μετριέται η ποσότητα συσσωρευμένου νερού. Για τη μέτρηση, το δοχείο που χρησιμοποιεί περιλαμβάνει βαθμονομημένη κλίμακα. Από την άλλη πλευρά, τα βροχόμετρα ανατρεπόμενου κάδου λειτουργούν αυτόματα. Γενικά, το νερό της βροχής περνάει από ένα χωνί σε έναν ανοιχτό μεταλλικό ή πλαστικό “κάδο” σε έναν περιστρεφόμενο βραχίονα. Όταν το βάρος του “κάδου” φτάσει σε κάποιο όριο το οποίο ισοδυναμεί με ένα ορισμένο ύψος βροχής, τότε αυτός περιστρέφεται σε μια θέση όπου αδειάζει το συσσωρευμένο νερό και η μέτρηση καταγράφεται αυτόματα από κάποιο σύστημα συλλογής δεδομένων. Συνήθως στην άλλη πλευρά του “κάδου” βρίσκεται και ένας δεύτερος. Κατά την περιστροφή, όταν ο ένας “κάδος” αδειάζει, ο δεύτερος έρχεται σε θέση όπου αρχίζει να συσσωρεύεται σε αυτόν το νερό, και ακολουθεί μια συνεχής εναλλαγή από τον έναν στον άλλον, με την εναλλασσόμενη περιστροφή του βραχίονα προς τα δεξιά ή τα αριστερά.

Τα βροχόμετρα μπορούν να παρέχουν γενικά άμεσες μετρήσεις της βροχής, και είναι σε θέση να μετρούν μικρές ποσότητες βροχής με μεγάλη ακρίβεια, καθιστώντας τα απαραίτητα για λεπτομερή τοπικά δεδομένα βροχής. Επιπλέον, είναι σχετικά απλά στη χρήση και τη συντήρηση, απαιτώντας ελάχιστη τεχνική εμπειρία, ενώ η μηχανική τους φύση σημαίνει μικρότερη πιθανότητα δυσλειτουργίας σε σύγκριση με ηλεκτρονικά όργανα. Επιπλέον, τα βροχόμετρα είναι γενικά φθηνά σε αντίθεση με άλλα προηγμένα συστήματα μέτρησης, όπως τα ραντάρ και οι δορυφόροι, καθιστώντας τα προσιτά για ευρεία χρήση.

Ωστόσο, τα βροχόμετρα παρουσιάζουν και κάποιους περιορισμούς. Ένας σημαντικός περιορισμός είναι η αδυναμία τους να παρέχουν πληροφορίες έντασης της βροχής για μεγάλες εκτάσεις, καθώς μπορούν να μετράνε μόνο στο συγκεκριμένο σημείο όπου τοποθετούνται. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά κενά στα δεδομένα, ιδίως σε περιοχές με αραιά δίκτυα βροχόμετρων. Επίσης, η εξάτμιση του νερού ή περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως ο άνεμος, μπορούν να επηρεάσουν την εγκυρότητα των μετρήσεων, οδηγώντας είτε σε υποεκτίμηση είτε σε υπερεκτίμηση της έντασης της βροχής. Έτσι απαιτείται προσεκτική τοποθέτηση και συντήρηση για την ελαχιστοποίηση τέτοιων σφαλμάτων. Επιπλέον, στην απλή τους μορφή τα βροχόμετρα απαιτούν χειροκίνητη συλλογή δεδομένων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ανθρώπινα σφάλματα ενώ παράλληλα οδηγεί αναπόφευκτα και σε μεγάλους χρόνους δειγματοληψίας. Τέλος, αν και πλέον πολλά βροχόμετρα είναι αυτοματοποιημένα, εξακολουθούν να χρειάζονται περιοδικούς ελέγχους και βαθμονομήσεις.

Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, τα βροχόμετρα παραμένουν ένα βασικό εργαλείο στη μετεωρολογία, την υδρολογία και σε διάφορους άλλους τομείς που απαιτούν ακριβείς μετρήσεις βροχής σε τοπική κλίμακα [32].

Δισδρόμετρα

Τα δισδρόμετρα (disdrometers) είναι εξελιγμένα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κατανομής του μεγέθους (DSD) και της ταχύτητας των σταγόνων βροχής. Είναι ζωτικής σημασίας στη μετεωρολογία για την παροχή λεπτομερών δεδομένων σχετικά με τις μικροφυσικές ιδιότητες της βροχής. Οι πληροφορίες αυτές είναι απαραίτητες για διάφορες εφαρμογές, όπως η πρόγνωση του καιρού, η κλιματική έρευνα και οι υδρολογικές μελέτες. Κυκλοφορούν διάφοροι τύποι δισδρομέτρων, καθένας από τους οποίους χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθοδολογίες για την καταγραφή των χαρακτηριστικών των σταγόνων βροχής.

Ένας συνηθισμένος τύπος δισδρομέτρου είναι το δισδρόμετρο πρόσκρουσης. Αυτά τα όργανα μετρούν το μέγεθος της σταγόνας βροχής ανιχνεύοντας τη δύναμη πρόσκρουσης όταν μια σταγόνα πέφτει πάνω σε μια αισθητήρια επιφάνεια. Για παράδειγμα, το δισδρόμετρο Joss-Waldvogel (JWD), ένα από τα πρώτα μοντέλα, χρησιμοποιεί ένα φύλλο αλουμινίου που περιβάλλει έναν κώνο από φελιζόλ. Όταν μια σταγόνα βροχής προσκρούει στο φύλλο, μετακινεί τον κώνο και ένα προσαρτημένο πηνίο μέσω ενός μαγνητικού πεδίου, προκαλώντας έναν ηλεκτρικό παλμό εξ επαγωγής. Το πλάτος αυτού του παλμού είναι ανάλογο με το μέγεθος της σταγόνας βροχής. Αν και χρησιμοποιούνται ευρέως, τα κρουστικά δισδρόμετρα έχουν περιορισμούς, όπως η υποεκτίμηση των μικρών σταγόνων βροχής κατά τη διάρκεια υψηλών εντάσεων βροχής και η επιρροή τους από τον άνεμο και τον ακουστικό θόρυβο.

Ένας δεύτερος τύπος δισδρομέτρων είναι τα οπτικά δισδρόμετρα, τα οποία αποτελούν μια πιο προηγμένη τεχνολογία. Χρησιμοποιούν μια δέσμη λέιζερ ή άλλη πηγή φωτός. Ένας φωτοανιχνευτής μετράει τη μείωση της έντασης του φωτός που προκαλείται από τις σταγόνες

βροχής οι οποίες διέρχονται από τη δέσμη φωτός. Τα οπτικά δισδρόμετρα μπορούν να μετρήσουν τόσο το μέγεθος όσο και την ταχύτητα των σταγόνων βροχής, προσφέροντας ακριβέστερα και λεπτομερέστερα δεδομένα από τα δισδρόμετρα πρόσκρουσης. Ωστόσο, απαιτούν ακριβή ευθυγράμμιση των οπτικών τους στοιχείων και οι μετρήσεις τους μπορούν να παραμορφωθούν από τον άνεμο.

Ένας ακόμα τύπος δισδρομέτρου είναι το δισδρόμετρο ραντάρ. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν την τεχνολογία ραντάρ Doppler για τη μέτρηση της ταχύτητας πτώσης των σταγόνων βροχής. Αναλύοντας τις μετατοπίσεις Doppler στα σήματα ραντάρ, μπορεί να εξαχθεί το μέγεθος και η κατανομή των σταγόνων βροχής. Τα δισδρόμετρα ραντάρ, παρέχουν το πλεονέκτημα των μεγάλων όγκων δειγματοληψίας και της υψηλής χρονικής ανάλυσης, καθιστώντας τα κατάλληλα για τη μελέτη της εξέλιξης της κατανομής του μεγέθους των σταγόνων βροχής (DSD) με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, η ακρίβειά τους μπορεί να επηρεαστεί από τις κάθετες ταχύτητες του αέρα και την εξασθένηση σήματος λόγω της βροχής.

Συνολικά, τα δισδρόμετρα είναι πολύ χρήσιμα λόγω της ικανότητάς τους να μετράνε μικροφυσικές ιδιότητες της βροχής. Κάθε τύπος έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά όλα μαζί συμβάλλουν σημαντικά στην κατανόηση των μοτίβων της βροχής [36].

Ραντάρ Καιρού

Τα ραντάρ καιρού είναι μια εξελιγμένη μέθοδος μέτρησης της έντασης της βροχής, που αξιοποιεί την ανάκλαση των μικροκυμάτων από τις σταγόνες βροχής για την εκτίμησή της σε μεγάλες εκτάσεις. Σε αντίθεση με τα βροχόμετρα, τα οποία παρέχουν σημειακά δεδομένα, τα ραντάρ καιρού προσφέρουν εκτεταμένη χωρική κάλυψη, κάτι που αποτελεί και βασικό τους πλεονέκτημα και τα καθιστά πολύ χρήσιμα για την πρόγνωση του καιρού, την παρακολούθηση καταιγίδων και την κατανόηση μοτίβων βροχής μεγάλης κλίμακας. Τα μικροκύματα που εκπέμπει ο πομπός ενός ραντάρ ανήκουν συνήθως στις περιοχές συχνοτήτων S, C ή X. Τα εκπεμπόμενα μικροκύματα σκεδάζονται όταν συναντούν σταγόνες βροχής, με μέρος της ενέργειας να ανακλάται πίσω στον δέκτη του ραντάρ. Αναλύοντας την ισχύ και τη χρονική καθυστέρηση του επιστρεφόμενου σήματος, το ραντάρ μπορεί να προσδιορίσει τη θέση και την ένταση της βροχής. Η δέσμη των εκπεμπόμενων μικροκυμάτων από τον πομπό του ραντάρ περιστρέφεται συνεχώς γύρω από έναν οριζόντιο άξονα ώστε να καλύψει κάθε γωνία γύρω από αυτό. Υπάρχει επίσης δυνατότητα και κατακόρυφης περιστροφής, ενώ κάποια ραντάρ χρησιμοποιούν και περισσότερες από μια δέσμη.

Ωστόσο, τα ραντάρ καιρού έχουν και αυτά κάποιους περιορισμούς. Η ακρίβεια των μετρήσεών τους μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος της βροχής, η παρουσία εμποδίων, όπως για παράδειγμα βουνά ή κτήρια, και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως είναι η θερμοκρασία και η υγρασία. Παράλληλα, σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και λόγω της καμπυλότητας της γης, μπορεί η δέσμη μικροκυμάτων να φτάσει

1.8 Καθιερωμένες τεχνικές μέτρησης της έντασης της βροχής και μια εναλλακτική προσέγγιση μέσω της εξασθένησης σήματος

πάνω από τα σύννεφα και να μην ανιχνευτεί η βροχή σε χαμηλότερα ύψη. Για αυτόν τον λόγο συνήθως είναι απαραίτητη η χρήση τους σε συνδυασμό με βροχόμετρα, για τη μέτρηση της έντασης της βροχής στο ύψος του εδάφους. Μια τυπική μέγιστη απόσταση για μικροκύματα της περιοχής C μπορεί να είναι από 100 έως 250 km, με ανάλυση 5 km. Επιπλέον, ενώ τα συστήματα ραντάρ παρέχουν εξαιρετική χωρική κάλυψη, η χρονική τους ανάλυση μπορεί να είναι περιορισμένη. Αυτό οφείλεται στον χρόνο που απαιτείται από κάποιο ραντάρ για την σάρωση ολόκληρης της περιοχής γύρω του.

Συνολικά, τα ραντάρ καιρού είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη μέτρηση της βροχής και την πρόγνωση του καιρού, αλλά πρέπει να συνδυάζονται με άλλες μεθόδους, όπως τα βροχόμετρα και οι δορυφορικές παρατηρήσεις, για την εξασφάλιση ολοκληρωμένων και υψηλής ακρίβειας δεδομένων. Η ικανότητα τους να καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις και να προσφέρουν μετρήσεις σχετικά με τη χωρική μεταβλητότητα της βροχής τα καθιστά απαραίτητα για τη σύγχρονη μετεωρολογία παρά του περιορισμούς τους [32].

Μετεωρολογικοί δορυφόροι

Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι είναι και αυτοί πολύ σημαντικοί για την παρακολούθηση της βροχής. Παρέχουν μια ολοκληρωμένη κάλυψη που συμπληρώνει μετρήσεις από βροχόμετρα ή ραντάρ καιρού. Χρησιμοποιούν τεχνολογίες τηλεπισκόπησης για την παρατήρηση των σύννεφων και της βροχής, αξιοποιώντας όργανα όπως αισθητήρες ορατού φωτός, υπέρυθρου και μικροκυμάτων. Για την εκτίμηση της έντασης της βροχής οι δορυφόροι χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές, όπως η ανάλυση των θερμοκρασιών στην κορυφή των σύννεφων και η ανάλυση της μορφολογίας της νεφοκάλυψης. Για την ερμηνεία των δεδομένων χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι συχνά ενσωματώνουν αποτελέσματα από μοντέλα αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού, καθώς και εμπειρικές σχέσεις που βαθμονομούνται από παρελθοντικές παρατηρήσεις. Με τη συλλογή δεδομένων από το διάστημα, οι δορυφόροι μπορούν να παρακολουθούν τη βροχή σε τεράστιες εκτάσεις, πολλές από τις οποίες μπορεί να είναι απρόσιτες από την επιφάνεια της γης. Έτσι, μπορούν να προσφέρουν μια παγκόσμια εικόνα που είναι πολύτιμη για την πρόγνωση του καιρού, αλλά και για κλιματικές μελέτες.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των μετεωρολογικών δορυφόρων είναι η ικανότητά τους να παρέχουν συνεχή, σχεδόν παγκόσμια κάλυψη. Αυτή η εκτεταμένη χωρική εμβέλεια επιτρέπει την παρακολούθηση συστημάτων καιρού και μοτίβων βροχής μεγάλης κλίμακας, κάτι που είναι απαραίτητο και για εφαρμογές όπως η πρόγνωση πλημμυρών και η επιτήρηση της ξηρασίας. Οι δορυφόροι είναι επίσης ιδιαίτερα χρήσιμοι για την παρακολούθηση του καιρού σε πραγματικό χρόνο, καθώς μπορούν να καταγράφουν την ανάπτυξη και την κίνηση καταιγίδων, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για τα συστήματα έκτακτης προειδοποίησης. Επιπλέον, μπορούν να συλλέγουν πληροφορίες σχετικά και με άλλες μετεωρολογικές και υδρολογικές μεταβλητές, όπως η υγρασία του εδάφους, η κάλυψη του χιονιού, καθώς και η

εδαφική χρήση και η κάλυψη της βλάστησης, οι οποίες είναι σημαντικές τόσο για την πρόγνωση του καιρού όσο και για τα υδρολογικά μοντέλα.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους οι μετεωρολογικοί δορυφόροι έχουν και κάποιους περιορισμούς. Συγκεκριμένα, η ακρίβεια και η ανάλυση των δορυφορικών μετρήσεων είναι επιρρεπής σε σφάλματα ανάλογα με τη νεφοκάλυψη, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τον τύπο της βροχής. Για παράδειγμα, χαμηλής έντασης βροχή ή ψιχάλα είναι αδύνατο να εντοπιστεί με ακρίβεια από το διάστημα. Ωστόσο, η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη και η ανάπτυξη οργάνων που χρησιμοποιούν πληθώρα αισθητήρων και τα οποία συνδυάζουν μετρήσεις από ραντάρ καιρού αλλά και από βροχόμετρα, έχουν βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία των εκτιμήσεων βροχής από μετεωρολογικούς δορυφόρους.

Συνολικά, οι μετεωρολογικοί δορυφόροι είναι πολύ σημαντικοί για παγκόσμιες εκτιμήσεις της έντασης της βροχής. Παρά τους περιορισμούς τους όσον αφορά την ακρίβεια και την ανάλυση των δεδομένων τους, συνδυαστικά με άλλες μεθόδους μετεωρολογικών μετρήσεων μπορούν να εξασφαλίσουν αξιόπιστες εκτιμήσεις [32].

1.8.2 Εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος μικροκυματικών ζεύξεων

Η μέτρηση και η καταγραφή της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος αποτελεί ένα ερευνητικό πεδίο για το οποίο υπάρχει έντονο ενδιαφέρον, ιδιαίτερα κατά τα τελευταία 10 χρόνια. Σε αρκετές μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο χρησιμοποιούνται μετρήσεις από εξειδικευμένες πειραματικές διατάξεις. Στην πλειοψηφία τους όμως, οι σχετικές μελέτες, βασίζονται σε εμπορικές μικροκυματικές ζεύξεις (CML, Commercial Microwave Links) του δικτύου backhaul, δηλαδή στις ζεύξεις που χρησιμοποιούνται ευρέως για τις τηλεπικοινωνίες. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες μελέτες είναι γενικά ανώτερες των 10 GHz, καθώς η εξασθένηση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με χαμηλότερες συχνότητες, όπου η ανίχνευσή της είναι γενικά δυσκολότερη.

Η μέθοδος εκτίμησης της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος σε CMLs μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Μπορεί να παρέχει υψηλή χωρική κάλυψη, λόγω της ευρείας παρουσίας τέτοιων ζεύξεων, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα, όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι μπορεί να συναντήσουν περιορισμούς. Επιπλέον, καθώς η μέθοδος αυτή αξιοποιεί την υπάρχουσα τηλεπικοινωνιακή υποδομή, καθίσταται ιδιαίτερα αποδοτική λύση χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες επενδύσεις σε νέο μετεωρολογικό εξοπλισμό. Γενικά, η συγκεκριμένη μέθοδος θα μπορούσε μελλοντικά να συμπληρώσει τα παραδοσιακά βροχόμετρα και τα συστήματα ραντάρ, ενισχύοντας έτσι τη συνολική ακρίβεια και αξιοπιστία των μετρήσεων βροχής.

Τέτοιες μελέτες συναντούν συχνά και κάποιες δυσκολίες. Βασική δυσκολία αποτελεί η περιορισμένη πρόσβαση στα δεδομένα ισχύος από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Επίσης τα CMLs έχουν σχεδιαστεί για την αποτελεσματική επικοινωνία και όχι για την ακριβή μέτρηση της ισχύος. Επομένως, η περιορισμένη ανάλυση ως προς τις μετρήσεις ισχύος

σήματος αποτελεί έναν ακόμα περιορισμό. Επιπλέον, η παρεμβολή εμποδίων μεταξύ πομπού και δέκτη, η εισαγωγή σφαλμάτων στις μετρήσεις όταν η επιφάνεια μιας κεραίας είναι βρεγμένη και οι αναταράξεις στις οποίες υπόκειται μια κεραία λόγω ισχυρών ανέμων είναι κάποιοι ακόμα συνήθεις παράγοντες που οδηγούν σε δυσκολίες κατά την εκτίμηση της έντασης της βροχής [37–40].

Οι πρώτες μετρήσεις της εξασθένησης σήματος λόγω της βροχής έγιναν το διάστημα από το 1942 έως το 1962 [41]. Σε μια μελέτη που δημοσιεύθηκε το 1947, προσδιορίστηκε πειραματικά η εξασθένηση σε μια ζεύξη συχνότητας 24 GHz, και μήκους 2 km [42]. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκαν εννιά βροχόμετρα κατά μήκος της ζεύξης, και κάθε 30 δευτερόλεπτα μετρούνταν η ισχύς σήματος. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στο Χίλο της Χαβάης και η διάταξη πομπού-δέκτη βασιζόταν σε παραβολικές κεραίες 24 ιντσών με μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ τα 50 mW. Επιλέχθηκαν και αναλύθηκαν έξι περιστατικά βροχής, έντασης από 5 έως 41 mm/h. Την ίδια περίοδο χρησιμοποιήθηκε και η τεχνολογία ραντάρ για την εκτίμηση της εξασθένησης του εκπεμπόμενου σήματος κατά τη διάρκεια βροχής, σε σύγκριση με την ξηρή περίοδο [43]. Ένας ανακλαστήρας βρίσκονταν σε απόσταση 6.9 km από το ραντάρ, διατηρώντας οπτική επαφή (LOS, Line Of Sight), και κατά μήκος της διαδρομής υπήρχαν οκτώ τυπικά βροχόμετρα. Το μήκος κύματος του ραντάρ ήταν 6.8 mm (συχνότητα 44.1 GHz). Η γραμμική θεωρητική σχέση μεταξύ εξασθένησης και έντασης της βροχής δεν επιβεβαιώθηκε πειραματικά για μήκος κύματος 8.6 mm (συχνότητα 34.8 GHz) και για ένταση βροχής κάτω των 2 mm/h. Επιπλέον, σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, περίπου 3, 5 και 10 cm, η υπολογισμένη εξασθένηση ήταν μικρότερη από τις πειραματικές μετρήσεις, ιδιαίτερα για μικρές εντάσεις βροχής. Το 1977, μια ερευνητική ομάδα έδειξε πως, για τη μέτρηση της μέσης έντασης της βροχής κατά μήκος μιας διαδρομής, οι μέθοδοι που βασίζονται σε μονόδρομη κατεύθυνση του σήματος μεταξύ πομπού και δέκτη είναι καλύτερες από τις μεθόδους ραντάρ, όπου μετριέται το σήμα που επιστρέφει από ανάκλαση [31]. Σε όλες τις μελέτες της εποχής, παρατηρούνταν σημαντική διαφορά στα πειραματικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τη θεωρία. Η μετρούμενη εξασθένηση του σήματος λόγω της βροχής ήταν πολύ πιο έντονη από την εξασθένηση που προβλέπονταν από τη θεωρία [34].

Μελέτες σχετικές με την εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω εμπορικών μικροκυματικών ζεύξεων

Οι έρευνες πάνω στο αντικείμενο της εξασθένησης σήματος λόγω της βροχής έχουν βασιστεί κυρίως σε δεδομένα ισχύος από CMLs. Μια ερευνητική ομάδα στο Ρότερνταμ της Ολλανδίας βασίστηκε σε 57 εμπορικές ζεύξεις συχνοτήτων 13 έως 39 GHz για τη μέτρηση της βροχής σε αστικές περιοχές [44]. Το μέσο μήκος ζεύξης ήταν 3.7 km. Η αποτίμηση των μετρήσεων έγινε με ραντάρ καιρού Doppler που λειτουργούσαν στη ζώνη C, και με ένα δίκτυο βροχόμετρων. Επίσης, επιβεβαιώθηκε και ένας αλγόριθμος προσδιορισμού της βροχής, με τα δεδομένα μιας ερευνητικής ζεύξης που λειτουργούσε στα 27 GHz.

Μια άλλη ομάδα στη Νότια Γερμανία χρησιμοποίησε δεδομένα από πέντε δίκτυα backhaul [45]. Τα δεδομένα δεν προέρχονταν από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, αλλά από την εγκατάσταση ειδικού εξοπλισμού πάνω στους σταθμούς βάσης. Προτάθηκε μια νέα μέθοδος για την ανίχνευση υγρών ή ξηρών περιόδων μέσω φασματικής ανάλυσης. Χρησιμοποιώντας έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) επιτεύχθηκε υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις ισχύος, της τάξεως του 0.01 dB. Οι μετρήσεις συγκρίθηκαν με εκείνες από έξι βροχόμετρα, καθώς και από ένα ραντάρ καιρού στη ζώνη C. Σε μια ακόμα δημοσίευσή τους, χρησιμοποίησαν δεδομένα από περίπου 2400 ζεύξεις συχνοτήτων από 37 έως 40 GHz, με μέσο μήκος ζεύξης τα 3 km [46]. Η ακρίβεια των μετρήσεων ήταν 1 dB. Δεδομένα από ένα ραντάρ καιρού χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του αλγόριθμου που ήταν υπεύθυνος για τον προσδιορισμό της βροχής μέσω των μικροκυματικών ζεύξεων.

Δύο ερευνητικές ομάδες στην Ελβετία χρησιμοποίησαν δεδομένα από μικροκυματικές ζεύξεις στην περιοχή της Ζυρίχης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για περίπου έναν χρόνο με 14 μικροκυματικές ζεύξεις και συχνότητες λειτουργίας 23, 38 και 58 GHz. Η λαμβανόμενη ισχύς καταγράφονταν με χρονική ανάλυση δύο και πέντε λεπτών, ενώ η εκπεμπόμενη ισχύς ήταν άγνωστη. Χρησιμοποιήθηκαν 14 βροχόμετρα για την αποτίμηση των δεδομένων. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης προτάθηκαν αλγόριθμοι ανίχνευσης σφαλμάτων [47]. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν μια νέα μέθοδο για την εκτίμηση του ρυθμού βροχής και της αβεβαιότητάς του, βασιζόμενοι στη μεταβλητή προσέγγιση που παρουσιάζεται στο άρθρο [48], και εφαρμόζοντας φιλτράρισμα Kalman. Στην έρευνά τους περιλαμβάνονται πεδία βροχής μέσω ραντάρ με χωρική ανάλυση $1 \times 1 \text{ km}^2$ και με χρονική ανάλυση 5 λεπτών σε μια αστική περιοχή $20 \times 20 \text{ km}^2$. Επιπλέον, το δίκτυο ραντάρ MeteoSwiss υπολόγισε την ένταση της βροχής και τη συνδύασε με τις εντάσεις που βρέθηκαν από 14 βροχόμετρα και με αυτές που εκτιμήθηκαν από 14 μικροκυματικές ζεύξεις που λειτουργούσαν στα 23, 38 και 58 GHz. Η ακρίβεια μέτρησης της ισχύος ήταν 0.1 ή 1 dB. Κατάφεραν να υπολογίσουν με μεγάλη ακρίβεια τη χωρική κατανομή και κατ' επέκταση την ένταση της βροχής [48].

Στη Δυτική Αφρική, στη Μπουρκίνα Φάσο, χρησιμοποιήθηκε μια ζεύξη συχνότητας 7 GHz, μήκους 29 km, και ακρίβειας 1 dB, για διάστημα δύο μηνών [49]. Για την αποτίμηση των δεδομένων ισχύος χρησιμοποιήθηκε ένα βροχόμετρο με χρόνο δειγματοληψίας πέντε λεπτών. Χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον δεδομένα από υψηλής ανάλυσης ραντάρ στη ζώνη X για τη συσχέτιση με τα δεδομένα ισχύος.

Οι συγγραφείς του άρθρου [50] καθώς και του συμπληρωματικού άρθρου [51] έκαναν μετρήσεις ισχύος σήματος από αρκετές ζεύξεις. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο ενός δέντρου κατηγοριοποίησης κατάφεραν συμφωνία 85% με ένα δισδρόμετρο, το οποίο λάμβανε μετρήσεις κάθε 15 λεπτά. Στα πλαίσια της μελέτης η βροχή κατηγοριοποιήθηκε σε τρεις κατηγορίες: σκέτη βροχή, χιονόνερο και απουσία βροχής.

Στις Φιλιππίνες, μια ερευνητική ομάδα χρησιμοποίησε την υπάρχουσα υποδομή του ασύρματου δικτύου Smart Bro, λαμβάνοντας δεδομένα ισχύος σήματος από 700 συνδρομητές με χρονική ανάλυση ενός λεπτού. Η διάρκεια της καταγραφής μετρήσεων ήταν

1.8 Καθιερωμένες τεχνικές μέτρησης της έντασης της βροχής και μια εναλλακτική προσέγγιση μέσω της εξασθένησης σήματος

από τον Ιούλιο του 2012 έως το τέλος του 2013. Εκτός από την εξασθένηση του σήματος χρησιμοποιήθηκε και η μεταβλητότά του για τον εντοπισμό της παρουσίας ή μη βροχής. Επίσης, για υψηλής έντασης βροχές κατασκευάστηκαν χάρτες με χρώματα ανάλογα της ισχύος σήματος. Οι μετρήσεις κάλυψαν την περίοδο των μουσώνων του 2012, καθώς και τον καταστροφικό τυφώνα Χαϊγιάν του 2013.

Μια ομάδα ερευνητών στη Νιγηρία ασχολήθηκε με τον προσδιορισμό της εξασθένησης που προκαλείται από τη βροχή μέσω μετρήσεων ισχύος σήματος σε ασύρματες ζεύξεις συχνοτήτων από 13 και 15 GHz. Μέσω των μετρήσεων κατασκεύασαν ένα εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης της έντασης της βροχής. Εξετάστηκε ένα πολυωνυμικό μοντέλο και συγκρίθηκε με το μοντέλο νόμου δύναμης του οργανισμού ITU-R (International Telecommunications Union – Radiocommunication Sector, Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών - Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών), και διαπιστώθηκε η επίτευξη μικρότερων σφαλμάτων [52].

Στην Πράγα της Τσεχίας, χρησιμοποιήθηκαν 14 ζεύξεις συχνοτήτων μεταξύ 25 και 39 GHz, και με ρυθμό δειγματοληψίας 5 μετρήσεων ανά λεπτό [53]. Τρία βροχόμετρα κάλυπταν μια περιοχή 2.3 km². Εκτιμήσεις της βροχής πραγματοποιούνταν μέσω του νόμου δύναμης $k = aR^b$, όπου R είναι ο μέσος ρυθμός βροχόπτωσης σε km/h, k είναι η εξασθένηση σε dB/km, και a, b είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τη συχνότητα, την πόλωση, καθώς και τη θερμοκρασία αλλά και την κατανομή μεγέθους των σταγόνων βροχής [54], που προκύπτουν από το μοντέλο ITU [55]. Για τον προσδιορισμό της εξασθένησης που οφείλεται στη βροχή, ορίστηκε μια τιμή αναφοράς κατά τη διάρκεια μιας υγρής περιόδου, μέσω της συνολικής εξασθένησης σε ένα χρονικό παράθυρο μιας ώρας πριν, και έξι μετά την περίοδο βροχής, ώστε να εξαλειφθεί η εξασθένηση που προκαλείται όταν η κεραία είναι βρεγμένη. Σε ξηρές περιόδους, η τιμή αυτή ήταν απλά η διαφορά εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ισχύος. Σε αντίθεση με τα συμβατικά βροχόμετρα, η απόδοση των μικροκυματικών ζεύξεων είναι σχετικά πιο σταθερή σε όλες τις διατάξεις τοπολογιών, ακόμη και κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχών που παρουσιάζουν έντονη χρονική και χωρική μεταβλητότητα.

Ένα σύστημα συλλογής δεδομένων (DAQ, Data Acquisition System) αναπτύχθηκε στη Γερμανία [56]. Μπορούσε να συλλέγει δεδομένα ταυτόχρονα από πληθώρα CMLs σε πραγματικό χρόνο, με χρονική ανάλυση ενός δευτερολέπτου. Το σύστημα δοκιμάστηκε σε 450 ζεύξεις Ericsson MINI-LINK TN, αλλά η χρήση του μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες ζεύξεις.

Σε μια ακόμα μελέτη στην Ολλανδία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 2044 ζεύξεις σε μια έκταση περίπου 35000 km² [57]. Τα επίπεδα λαμβανόμενου σήματος καταγράφονταν με ρυθμό δειγματοληψίας 10 Hz, ενώ οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της λαμβανόμενης ισχύος αποθηκεύονταν κάθε 15 λεπτά. Η ανάλυση ισχύος των ζεύξεων ήταν είτε 0.1 dB είτε 1 dB. Συνολικά τα αξιοποιήσιμα δεδομένα αφορούσαν 894 μέρες, ενώ η συχνότητα λειτουργίας για την πλειοψηφία των ζεύξεων ήταν μεταξύ 37 και 40 GHz. Δύο δίκτυα βροχόμετρων χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση των δεδομένων, ένα αυτοματοποιημένο και ένα χειροκίνητο. Το αυτοματοποιημένο δίκτυο, με πυκνότητα περίπου 1 βροχόμετρο ανά

1000 km², μετρούσε τη συσσώρευση βροχής κάθε ώρα και τη συνολική συσσώρευση σε ημερήσια βάση. Στο χειροκίνητο δίκτυο, τα δεδομένα λαμβάνονταν σε ημερήσια βάση και η πυκνότητα ήταν περίπου ένα βροχόμετρο ανά 100 km². Πρόσθετα δεδομένα βροχόπτωσης ελήφθησαν από δύο επίγεια μετεωρολογικά ραντάρ που λειτουργούσαν στη ζώνη συχνοτήτων C. Η εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω των δεδομένων εξασθένησης είχε πολύ θετικά αποτελέσματα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, αλλά μεγάλες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν κατά τον χειμώνα.

Στην Ιταλία, στην περιοχή του Τρεβίζο, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα εξασθένησης από μικροκυματικές ζεύξεις που λειτουργούσαν στη ζώνη K, στα 25 GHz, και δημιουργήθηκαν δυσδιάστατοι χάρτες βροχής [58]. Το μέσο μήκος ζεύξης ήταν 6 km, ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν 15 μετρήσεις ανά 2 λεπτά, και η ανάλυση ισχύος ήταν 3 dB. Οι μετρήσεις αφορούσαν τον Σεπτέμβριο του 2015. Χρησιμοποιήθηκαν 9 βροχόμετρα που μετρούσαν την συνολική συσσωρευμένη βροχή ανά 24 ώρες. Αν και ο αριθμός των ζεύξεων ήταν περιορισμένος, ο χάρτης βροχής που κατασκευάστηκε από αυτές ήταν αρκετά ικανοποιητικός συγκρινόμενος με τον χάρτη που προέκυψε από το δίκτυο βροχόμετρων.

Στο Σάο Πάολο της Βραζιλίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ένα διάστημα 81 ημερών χρησιμοποιώντας 147 ζεύξεις Ericsson και Huawei, σε συχνότητες 8 έως 23 GHz [59]. Η ανάλυση ως προς την ισχύ ήταν 0.1 dB. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε σε αποστάσεις μικρότερες των 20 km. Για την αποτίμηση της εξασθένησης λόγω της βροχής χρησιμοποιήθηκαν 152 βροχόμετρα, τα οποία λάμβαναν μετρήσεις ανά 10 λεπτά. Με τα βροχόμετρα επαληθεύτηκαν 30 λεπτά εκτιμήσεων βροχής, καθώς και η πιθανότητα βροχής σε υποτροπικά κλίματα όπως αυτό του Σάο Πάολο.

Στην Κουάλα Λουμπόρ της Μαλαισίας, έγιναν μετρήσεις για ένα έτος, μέσω μιας ζεύξης συχνότητας 73.5 GHz (ζώνη E), και μήκους 1.8 km [60]. Χρησιμοποιήθηκαν τρία βροχόμετρα ακρίβειας 0.2 mm, και η ζεύξη ήταν η Mini Link-6352 η οποία παρείχε μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ισχύος ανά 15 λεπτά. Αυτό ήταν και το πρώτο πείραμα που έγινε στην ζώνη E, και διεξήχθη σε ένα τροπικό περιβάλλον με έντονη βροχή.

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα έρευνα βασίστηκε στη βαθιά μάθηση σε επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα [61]. Για την εκτίμηση της βροχής λαμβάνονταν υπόψη μόνο οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές εξασθένησης προκειμένου να παραχθεί μια μέθοδος σταθμισμένου μέσου όρου για τον υπολογισμό της πραγματικής εξασθένησης. Επίσης, το προτεινόμενο μοντέλο αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα δισδρόμετρο (OTT PARSIVEL1, που βρίσκεται 20 km από τη Μελβούρνη) με χρόνο δειγματοληψίας 30 δευτερολέπτων. Μια πιο εις βάθος ματιά αποκαλύπτει ότι το προτεινόμενο μοντέλο ήταν πολύ καλύτερο από τις τυπικές μεθόδους εκτίμησης των μικροκυματικών ζεύξεων.

Πιο πρόσφατα, μια ερευνητική ομάδα στην Ολλανδία παρουσίασε τη δυνατότητα παρακολούθησης γενικά μετεωρολογικών φαινομένων με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένων των μικροκυματικών ζεύξεων [62]. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες ζεύξεις μεταξύ 18 και 40 GHz, με μέγιστο μήκος περίπου 10 km. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης

1.8 Καθιερωμένες τεχνικές μέτρησης της έντασης της βροχής και μια εναλλακτική προσέγγιση μέσω της εξασθένησης σήματος

δεδομένα από κινητά τηλέφωνα και προσωπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Το πείραμα διεξήχθη στην μητροπολιτική περιοχή του Άμστερνταμ για 17 ημέρες. Αν και κάθε πηγή παρουσίαζε περιορισμούς ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων, είναι γεγονός πως όσο αυξάνονταν τα λαμβανόμενα δεδομένα, τόσο καλύτερη ήταν η επισκόπηση υδρομετεωρολογικών φαινομένων.

Στη μελέτη [63] που έγινε στο Τζιαγκίν της Κίνας, παρουσιάζεται η εκτίμηση της βροχής σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια μιας βροχερής περιόδου του 2020 με τη χρήση CMLs. Στην έρευνά αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από οκτώ μικροκυματικές ζεύξεις που λειτουργούσαν σε συχνότητες 15 GHz και 23 GHz. Η εξασθένηση που προκαλούνταν από τη βροχή σε αυτές τις ζεύξεις συσχετίστηκε με τις μετρήσεις των βροχόμετρων. Διαπιστώθηκε ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης και της πραγματικής έντασης βροχής, με συντελεστές συσχέτισης που ξεπέρασαν το 0.77 και σε ορισμένες περιπτώσεις και το 0.9. Το μέσο απόλυτο σφάλμα στους εκτιμώμενους ρυθμούς βροχής ήταν γενικά μικρότερο από 1.5 mm/h και η σχετική απόκλιση της συνολικής βροχής ήταν μικρότερη από 5%. Η μέθοδος αυτή κατέδειξε υψηλότερη χρονική ανάλυση στην εκτίμηση της βροχής σε σύγκριση με τα παραδοσιακά βροχόμετρα, παρέχοντας τη δυνατότητα για βελτιωμένη πρόβλεψη πλημμυρών και προειδοποίηση καταστροφών.

Στη Σρι Λάνκα, καταδείχθηκε η δυνατότητα παρακολούθησης τροπικών βροχών με τη χρήση CMLs [64]. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 3.5 μηνών, αναλύθηκαν δεδομένα από 1140 ζεύξεις κατά μέσο όρο με τη χρήση του πακέτου ανοικτού κώδικα RAINLINK. Αυτές οι εκτιμήσεις βροχής συγκρίθηκαν με τοπικά ωριαία και ημερήσια δεδομένα βροχόμετρων και δορυφορικούς χάρτες βροχής. Η μελέτη αυτή αναδεικνύει τα CML ως πολύτιμη πηγή πληροφοριών βροχόπτωσης υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, ιδίως σε περιοχές με ελλιπή πρόσβαση στις συμβατικές μεθόδους μέτρησης της βροχής.

Στη Μελβούρνη της Αυστραλίας χρησιμοποιήθηκαν πάνω από 100 CML με συχνότητες που κυμαίνονταν μεταξύ 10 και 40 GHz [65]. Για ένα διάστημα δύο ετών, τα δεδομένα βροχής συλλέγονταν με τη χρήση του αλγορίθμου RAINLINK και με μετρήσεις ισχύος σήματος με χρόνο δειγματοληψίας 15 λεπτά. Η μελέτη συνέκρινε δύο μεθόδους δειγματοληψίας: μέσω της μέσης τιμής ή της ελάχιστης/μέγιστης τιμής της ισχύος σήματος. Για τον έλεγχο της ορθότητας των εκτιμήσεων βροχής χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα δεδομένα από ένα ραντάρ συνδυασμένο με βροχόμετρα, δείχνοντας ότι, σε σύγκριση με τα δεδομένα μέσης ισχύος σήματος, εκείνα ελάχιστης/μέγιστης τιμής της ισχύος είχαν καλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση της έντασης της βροχής.

Στο άρθρο [66] παρουσιάζεται ένας νέος αλγόριθμος για την εκτίμηση χαρτών βροχόπτωσης με το συνδυασμό μετρήσεων εξασθένησης από δορυφορικές ζεύξεις και CMLs. Η μελέτη χρησιμοποίησε έναν αλγόριθμο για τη συγχώνευση δεδομένων και από τους δύο τύπους συνδέσεων σε ένα τρισδιάστατο σενάριο, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη το φαινόμενο *virga*, το οποίο περιλαμβάνει τη μεταβολή της έντασης της βροχής με το ύψος λόγω περιβαλλοντικών διαφορών όπως η υγρασία. Η σύγκλιση του αλγορίθμου επικυρώθηκε

πειραματικά, δείχνοντας πως με την ενοποίηση δεδομένων από CMLs και εκείνων από δορυφορικές ζεύξεις η ακρίβεια του χάρτη βροχής βελτιώθηκε έως και 50%.

Μια μελέτη στην Τύρο του Λιβάνου παρουσίασε ένα μοντέλο χαμηλής πολυπλοκότητας για την εκτίμηση της βροχής με τη χρήση CMLs [67]. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο CMLs και ένα βροχόμετρο για 40 ημέρες. Ο αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης που αναπτύχθηκε, βασισμένος σε νευρωνικό δίκτυο ενός στρώματος, μείωσε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των εκτιμήσεων της έντασης της βροχής από 0.13 mm²/h σε 0.08 mm²/h, για τα δεδομένα εκπαίδευσης του μοντέλου, και από 0.2 mm²/h σε 0.1 mm²/h για τα δεδομένα ελέγχου του μοντέλου.

Στο Γκέτεμποργκ της Σουηδίας, διερευνήθηκε η δυνατότητα κατασκευής χαρτών βροχής υψηλής χωρικής ανάλυσης μέσω δικτύων CMLs [68]. Η μελέτη συνέκρινε δίκτυα CMLs με δίκτυα βροχόμετρων καθώς και δίκτυα που συνδυάζουν βροχόμετρα και CMLs για μετρήσεις βροχής κοντά στο έδαφος. Χάρτες από ένα ραντάρ ζώνης συχνότητας Χ χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση με τους εκτιμώμενους από τα δίκτυα βροχόμετρων και CMLs χάρτες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δίκτυα CMLs είχαν παρόμοιες επιδόσεις με τα δίκτυα βροχόμετρων στην εκτίμηση της χωρικής κατανομής της βροχής σε περιοχές με πυκνές μικροκομματικές ζεύξεις. Ωστόσο, τα δίκτυα CML υπερείχαν έναντι των δικτύων βροχόμετρων όσον αφορά τοπικές εκτιμήσεις βροχής, με την απόδοση να βελτιώνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητα των μικροκομματικών ζεύξεων στο δίκτυο. Στη μελέτη αυτή παρατηρήθηκε πως για μικρές αστικές περιοχές, η αναπαράσταση των CMLs με ένα μόνο εικονικό βροχόμετρο ήταν επαρκής για την κατασκευή χαρτών βροχής.

Στη Γερμανία, μελετήθηκε η ενσωμάτωση δεδομένων CMLs με δορυφορικά δεδομένα από τον δορυφόρο MSG SEVIRI για την ανίχνευση βροχής [69]. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 3748 CMLs κατά τη διάρκεια τεσσάρων μηνών το καλοκαίρι του 2021, και συνδυάστηκαν με δεδομένα από τον SEVIRI για τη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης. Αυτή η υβριδική προσέγγιση βελτίωσε τον συντελεστή συσχέτισης Matthews και αύξησε την ορθότητα των εκτιμήσεων, ιδίως για γεγονότα ασθενούς βροχής. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η ενσωμάτωση δορυφορικών δεδομένων βελτίωσε σημαντικά την ανίχνευση γεγονότων βροχής σε περιοχές με αραιές επίγειες μετρήσεις.

Στο Τζιανγκίν, της επαρχίας Τζιανγκσού, στην Κίνα, διεξήχθη ένα πείραμα μακροχρόνιας παρακολούθησης της βροχής με τη χρήση CMLs [70]. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 49 συνολικά ζεύξεις με συχνότητες από 15 έως 26 GHz και μήκη από 1.14 έως 4.78 km. Τα δεδομένα από τα CMLs συγκρίθηκαν με πέντε βροχόμετρα, ενώ χρησιμοποιήθηκε και ένα δισδρόμετρο για βελτίωση της ακρίβειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκτιμήσεις της ημερήσιας συσσωρευμένης βροχής από τα CMLs είχαν καλή συμφωνία με τα δεδομένα των βροχόμετρων, αποδεικνύοντας ότι τα δίκτυα CML μπορούν να παρακολουθούν και να προβλέπουν αποτελεσματικά τις αστικές πλημμύρες σε περιοχές που δεν διαθέτουν συμβατικά μετεωρολογικά όργανα.

1.8 Καθιερωμένες τεχνικές μέτρησης της έντασης της βροχής και μια εναλλακτική προσέγγιση μέσω της εξασθένησης σήματος

Σε μια ακόμα μελέτη ενοποιήθηκαν δεδομένα από CMLs μεταξύ της Τσεχίας και της Γερμανίας, με σκοπό την κατασκευή διασυνοριακών χαρτών βροχής [71]. Λόγω των διαφορών στα δεδομένα κάθε χώρας ήταν απαραίτητη η επεξεργασία μέσω απλών αλγορίθμων ώστε να γίνει αποτελεσματική ενοποίηση αυτών. Η μελέτη αυτή έδειξε πως με την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών χωρών μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν διασυνοριακοί χάρτες βροχής.

Μελέτες σχετικές με την εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω εξειδικευμένων πειραματικών διατάξεων

Πολύ λιγότερες ερευνητικές δραστηριότητες έχουν επικεντρωθεί σε θέματα συσχέτισης της εξασθένησης σήματος και της έντασης της βροχής έχοντας βασιστεί και σε πειραματικές διατάξεις. Στο Ντέρμπαν της Νότιας Αφρικής, συλλέχθηκαν δεδομένα για 1 έτος, σε ζεύξη μήκους 6.73 km και συχνότητας 19.5 GHz. Τα πειραματικά δεδομένα συγκρίθηκαν με βασικά θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού της εξασθένησης λόγω της βροχής. Ο χρόνος δειγματοληψίας τόσο της βροχής όσο και της ισχύος σήματος ήταν 1 λεπτό [72].

Στις Φιλιππίνες, όπου οι τυφώνες είναι συνηθισμένο φαινόμενο, σχεδιάστηκε ένα σύστημα συναγερμού για καταστροφές, βασισμένο σε μετρήσεις της εξασθένησης λόγω της βροχής σε μια μικροκυματική ζεύξη. Κατά μήκος της ζεύξης είχαν τοποθετηθεί ακουστικοί αισθητήρες ανά 100 μέτρα, ώστε να προσδιοριστεί η χωρική κατανομή της έντασης της βροχής. Για την κατασκευή του μοντέλου εξασθένησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τρία χρόνια. Οι ζεύξεις λειτουργούσαν στη συχνότητα των 26 GHz και απείχαν 4 km η μια από την άλλη. Οι βασικές παράμετροι που ενεργοποιούσαν το σύστημα συναγερμού ήταν μια οριακή τιμή της λαμβανόμενης ισχύος καθώς και η διάρκεια της βροχής [73].

Μια άλλη ερευνητική ομάδα παρατήρησε πως η βροχή επηρεάζει την ποιότητα του σήματος. Έπειτα και κατά την διάρκεια μιας περιόδου βροχών, η απόδοση κάποιων από τις μικροκυματικές ζεύξεις που χρησιμοποιήθηκαν και λειτουργούσαν στα 2.4 GHz, επηρεάστηκε θετικά, ενώ άλλων αρνητικά [74]. Καθώς σε αυτές τις συχνότητες η εξασθένηση λόγω της βροχής θεωρείται αμελητέα από τα υπάρχοντα θεωρητικά μοντέλα, οι συγγραφείς απέδωσαν ως αιτία του φαινομένου το νερό που συσσωρεύεται στην επιφάνεια των κεραιών, το οποίο προκαλεί μεταβολές στο διάγραμμα ακτινοβολίας. Ψεκάζοντας με νερό την επιφάνεια μιας κεραιάς, παρατήρησαν αρχικά αύξηση της ισχύος του σήματος, ενώ στη συνέχεια μείωση καθώς αυξάνονταν η ποσότητα του νερού.

Στη Γερμανία, σε μια μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια εξατομικευμένη μικροκυματική ζεύξη με συχνότητες λειτουργίας 22.235 και 34.8 GHz, για τη μέτρηση της βροχής και της υγρασίας. Το μήκος της ζεύξης ήταν 1.32 km, η συχνότητα δειγματοληψίας 20 Hz, και η ανάλυση της ισχύος 0.1 dB. Για την αποτίμηση των δεδομένων είχε τοποθετηθεί ένα δισδρόμετρο με δέσμη λέιζερ δίπλα στο σύστημα πομπού/δέκτη, ανάλυσης 1 λεπτού. Επίσης, κοντά στην περιοχή

των μετρήσεων βρίσκονταν και ένας μετεωρολογικός σταθμός που παρείχε πληροφορίες βροχής, υγρασίας, πίεσης και θερμοκρασίας, με χρονική ανάλυση 10 λεπτών.

Στην Ελλάδα, μελετήθηκε η επίδραση του καιρού στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, στο Αιγαίο Πέλαγος, χρησιμοποιώντας δεδομένα από σταθμούς που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε διάφορα νησιά [75]. Ο κύριος στόχος ήταν να αξιολογηθεί το επίπεδο εξασθένησης των μικροκυματικών ζεύξεων με βάση τις τοπικές μετρήσεις βροχής. Διαπιστώθηκε πως μέτρια βροχή προκάλεσε εξασθένηση περίπου 10 με 12 dB σε σήμα συχνότητας 2.4 GHz.

Σε μια ακόμα μελέτη στην Ελλάδα χρησιμοποιήθηκε μια εξατομικευμένη πειραματική διάταξη για μέτρηση της βροχής [76]. Η ανάλυση ως προς την ισχύ ήταν 0.0001 dB, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) ήταν 145dB, και ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν 0.2 λεπτά. Για την αποτίμηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα βροχόμετρο ακρίβειας 0.2 mm. Η διάρκεια των μετρήσεων ήταν ένας χρόνος. Η συχνότητα λειτουργίας ήταν 2 GHz, ενώ το μήκος της ζεύξης ήταν περίπου 20 m με τις κεραιές να βρίσκονται τοποθετημένες εντός δύο αντικριστών κτηρίων στην πανεπιστημιούπολη Ιωαννίνων, ώστε να αποφεύγονται απώλειες που προκαλούνται όταν η κεραιές βρέχονται, καθώς και λόγω των αναταράξεων από τον άνεμο. Επιπλέον, η ίδια ερευνητική ομάδα, παρουσίασε ένα μοντέλο εξασθένησης λόγω της βροχής στη ζώνη S έπειτα από τις μετρήσεις ενός χρόνου [77].

Στη Μαλαισία, δύο ερευνητικές ομάδες χρησιμοποίησαν μια ζεύξη 5G μήκους 1.3 km και συχνότητας λειτουργίας 26 GHz [78]. Βασίστηκαν σε μια ζεύξη Ericson mini CN 500. Για τη μέτρηση της βροχής χρησιμοποιήθηκε ένα βροχόμετρο με ευαισθησία 0.5 mm, με τον χρόνο δειγματοληψίας να είναι 1 λεπτό. Η μετρούμενη εξασθένηση κατά μήκος της ζεύξης εμφάνισε μια μέγιστη τιμή 34 dB, η οποία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις επικοινωνίες.

Μια ερευνητική ομάδα διεξήγαγε μετρήσεις για έναν χρόνο στο Ντάραμ της Αγγλίας χρησιμοποιώντας μια πειραματική ζεύξη με συχνότητες λειτουργίας 22.84 και 77.52 GHz, και μήκος 35 m. Η συσχέτιση της εξασθένησης με την βροχή έγινε με την βοήθεια ενός δισδρομέτρου, με χρόνο δειγματοληψίας 1 λεπτό, όσο ήταν και εκείνος μέτρησης της ισχύος. Παρατηρήθηκε πως η εξασθένηση ήταν πολύ μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη από το μοντέλο ITU. Μελετήθηκε επίσης και η επίδραση της συσσώρευσης νερού πάνω στην κεραιά.

Μια ερευνητική ομάδα στη Ναντσίνγκ της Κίνας, παρουσίασε τη δυνατότητα ανίχνευσης της βροχής μέσω των σημάτων κινητών τηλεφώνων [79]. Συλλέχθηκαν δεδομένα για τη διάρκεια περίπου ενός χρόνου. Η ζεύξη λειτουργούσε στα 2 GHz και απαρτιζόταν από μια γεννήτρια σήματος και έναν αναλυτή φάσματος, με τη μεταξύ τους απόσταση να είναι 504 m και χωρίς άμεση οπτική επαφή. Ο αναλυτής φάσματος προσέφερε 183 μετρήσεις ισχύος λαμβανόμενου σήματος το λεπτό, με ανάλυση 0.01 dB. Για την αποτίμηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα δισδρόμετρο χρονικής ανάλυσης ενός λεπτού. Παρουσιάστηκε και μια μέθοδος διαχωρισμού υγρών και ξηρών περιόδων, προσαρμοσμένη μέσω του αλγορίθμου C4.5.

Σε μια μελέτη στο Βάλχαιμ της Γερμανίας, χρησιμοποιήθηκε μια μοναδική πειραματική διάταξη για την ανάλυση μιας βρεγμένης κεραίας και την επίδραση του συσσωρευμένου νερού στην εκτιμώμενη τιμή της έντασης της βροχής [80]. Η διάταξη που υλοποιήθηκε παρείχε μετρήσεις βασισμένες στον συντελεστή ανάκλασης της κεραίας. Η καρδιά της διάταξης ήταν ένας αναλυτής δικτύου, ενώ ένα Raspberry Pi 3 χρησιμοποιήθηκε ως κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Δύο δισδρόμετρα, ένας μετεωρολογικός σταθμός και μια κάμερα χρησιμοποιήθηκαν για περεταίρω αποτίμηση των μετρήσεων ισχύος.

Στο άρθρο [81] μελετήθηκε ο αντίκτυπος των καιρικών συνθηκών στην εκτίμηση της απόστασης με βάση τη χρήση μετρήσεων ισχύος σήματος από κινητά τηλέφωνα εντός του δικτύου GSM. Η μελέτη επικεντρώθηκε στον τρόπο με τον οποίο διάφορες καιρικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της βροχής, της ομίχλης και του χιονιού, επηρεάζουν την ακρίβεια της εκτίμησης της απόστασης με βάση τις μετρήσεις ισχύος σήματος. Τα ευρήματα έδειξαν ότι οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την εξασθένηση του σήματος και, κατά συνέπεια, την ακρίβεια εκτίμησης της απόστασης, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για μοντέλα με επίγνωση των καιρικών συνθηκών στην εκτίμηση της απόστασης με βάση RF σήματα.

Στην Ιταλία, διερευνήθηκε η εκτίμηση της βροχής με βάση την εξασθένηση σήματος 4G/LTE που μετρήθηκε μέσω μιας κινητής συσκευής [82]. Η μελέτη πρότεινε μια νέα μέθοδο για την ταξινόμηση της έντασης της βροχής σε τέσσερις κατηγορίες: μηδενική βροχή, ασθενής βροχή, μέτρια βροχή και έντονη βροχή, με τη χρήση ενός πιθανολογικού νευρωνικού δικτύου. Η ταξινόμηση αυτή επιτεύχθηκε με τη χρήση τριών χαρακτηριστικών της ισχύος σήματος: τη στιγμιαία της τιμή, τη μέση της τιμή και τη διακύμανσή της, που υπολογίζονταν εντός ενός ολισθαίνοντος χρονικού παραθύρου. Η μέθοδος έδειξε υψηλή ακρίβεια με ποσοστό σωστών εκτιμήσεων 96.7%.

Μελέτες σχετικές με τις δυσκολίες εκτίμησης της έντασης της βροχής μέσω μικροκυματικών ζεύξεων

Διάφορες ομάδες έχουν ασχοληθεί και με τις δυσκολίες και τους περιορισμούς που συναντώνται στην εκτίμηση της βροχόπτωσης μέσω μικροκυματικών ζεύξεων. Μια ομάδα ασχολήθηκε με τον προσδιορισμό μέσων τιμών βροχόπτωσης κατά μήκος μιας διαδρομής, και την εκτίμηση των σφαλμάτων και αβεβαιοτήτων που οφείλονται στην μεταβλητότητα της βροχής [83]. Για τον σκοπό αυτόν, προσομοίωσαν σήματα ζεύξεων χρησιμοποιώντας μετρήσεις της κατανομής μεγέθους των σταγονιδίων βροχής, λαμβάνοντας ένα σύνολο δεδομένων σχεδόν 2 χρόνων. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με μετρήσεις ανέμου για την προσομοίωση των σημάτων ζεύξεων και τον υπολογισμό των κατάλληλων στατιστικών μεγεθών. Οι μικροκυματικές ζεύξεις χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως για την ανταλλαγή δεδομένων, κυρίως μεταξύ δικτύων κινητής τηλεφωνίας ή σταθμών βάσης. Ωστόσο, ο διαχωρισμός της εξασθένησης κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων από εκείνη λόγω

της βροχής είναι ένα δύσκολο πρόβλημα. Απαιτεί τον διαχωρισμό μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων.

Στο άρθρο [84], προτάθηκε μια μέθοδος εφαρμογής αυτής της διαδικασίας, και υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μετρήσεις μέσης εξασθένησης κατά μήκος μιας διαδρομής, από μικροκυματικές ζεύξεις. Ο διαχωρισμός υγρών και ξηρών περιόδων έγινε μέσω ανάλυσης της αλλοίωσης του σήματος των ζεύξεων. Η τιμή-όριο της ισχύος για τον διαχωρισμό, υπολογίζονταν σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας τη διαδικασία διαχωρισμού. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, που αποτελούνται από εμπορικές μικροκυματικές ζεύξεις, παρέχουν το πλεονέκτημα της μέτρησης της βροχόπτωσης κοντά στο έδαφος. Είναι όμως σχεδιασμένα για αποτελεσματικότερη επικοινωνία και όχι για μέτρηση της βροχόπτωσης, με αποτέλεσμα να εισάγονται αβεβαιότητες. Η ποσοτικοποίηση αυτών των αβεβαιοτήτων είναι απαραίτητη έτσι ώστε τα δεδομένα να είναι χρήσιμα.

Στο άρθρο [85], μελετήθηκαν διάφορες ατέλειες των οργάνων που αφορούσαν διακυμάνσεις του σήματος λόγω μιας βρεγμένης κεραίας, την αβεβαιότητα της τιμής αναφοράς της εξασθένησης (για διαχωρισμό υγρών και ξηρών περιόδων) και της ψηφιακής κβάντωσης. Μελετήθηκαν και περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η παρατηρούμενη μεταβολή της κατανομής μεγέθους των σταγόνων κατά μήκος μιας ζεύξης, που επηρεάζει την ακρίβεια της μετρούμενης μέσης εξασθένησης και της χωρικής μεταβλητότητας της βροχής, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ακρίβεια της εκτίμησης της βροχής σε περιοχές εκτός του εύρους της ζεύξης.

Οι συγγραφείς του άρθρου [86], χρησιμοποίησαν δεδομένα από μια πειραματική διάταξη στην περιοχή της Ζυρίχης και κατάφεραν με πρωτοφανή ακρίβεια και χρονική ανάλυση να υπολογίσουν την εξασθένηση που οφείλονταν στο νερό που συσσωρεύονταν στην επιφάνεια μιας κεραίας, γεγονός που επηρέαζε μια εμπορική ζεύξη.

Μια άλλη ομάδα συνδύασε δεδομένα από διαφορετικές πηγές και ανέπτυξε ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρών. Υπήρχαν 1800 σταθμοί μέτρησης της βροχής στην Κένυα, οι οποίοι δεν προσέφεραν δεδομένα πραγματικού χρόνου. Αξιοποιώντας δεδομένα εξασθένησης από μια εταιρεία τηλεπικοινωνιών με περισσότερες από 3000 ζεύξεις, με συχνότητες λειτουργίας 7, 8, 15 και 23 GHz και αποστάσεις μέχρι 80km, παράχθηκαν μεγάλες ποσότητες δεδομένων [87].

Οι ακριβείς μετρήσεις της βροχής είναι σημαντικές για πολλές εφαρμογές, όπως για την προειδοποίηση ξαφνικών πλημμυρών και για την διαχείριση των υδάτινων πόρων. Ωστόσο, η ακρίβεια των σημερινών διατάξεων είναι περιορισμένη λόγω αρκετών τεχνικών και πρακτικών παραγόντων. Στο άρθρο [88], παρουσιάστηκε μια μελέτη των υπάρχουσών δημοσιεύσεων και μελετών σε αυτό το αντικείμενο.

Οι συγγραφείς του άρθρου [89], χρησιμοποίησαν συστήματα διαχείρισης δικτύων (NMS, Network Management System) για να εξετάσουν τις μετρήσεις εξασθένησης που συλλέχθηκαν από δύο μικροκυματικές ζεύξεις κατά μια περίοδο πολλών βροχών. Έδειξαν ότι

η έξοδος του NMS περιλάμβανε πόλωση η οποία επηρέαζε τη διαδικασία προσδιορισμού της βροχής.

Στο άρθρο [90], οι συγγραφείς επεξήγησαν λεπτομερώς τη χρήση μικροκυματικών ζεύξεων από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιούνταν στην Ολλανδία από το 2003. Η αξιοποίηση των μετρήσεων από συστήματα ασύρματων επικοινωνιών και πλοήγησης για περιβαλλοντικές μετρήσεις, έχει επιδείξει έντονη χρησιμότητα ως προς την παρακολούθηση αρκετών ατμοσφαιρικών φαινομένων. Από την άλλη πλευρά, η συλλογή και αποθήκευση δεδομένων είναι ένα ανοιχτό ζήτημα όσον αφορά τις μετρήσεις πραγματικού χρόνου, καθώς και εκείνες που προέρχονται από διαφορετικές εταιρείες κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα αποθήκευσης και διαφέρουν και ως προς την ακρίβεια. Υπάρχουν επίσης ανοιχτά προβλήματα σχετικά με τη χρήση ετερογενών αισθητήρων μέτρησης σε μια περιοχή του φάσματος όπου υπάρχει πληθώρα τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων [91].

Στο άρθρο [92], προτάθηκε ένα μοντέλο που εξηγούσε και παράλληλα συσχέτιζε την εξασθένηση που οφείλεται σε μια βρεγμένη κεραία, με την ένταση της βροχής. Στα πλαίσια του μοντέλου, η επιπρόσθετη εξασθένηση έφτανε περίπου τα 3 dB όταν η ένταση της βροχής ήταν 100 mm/h. Στατιστικές τιμές της θεωρητικά προβλεπόμενης εξασθένησης, συμπεριλαμβανομένης αυτής που οφείλεται στην συσσώρευση νερού στην κεραία, συγκρίθηκαν με μετρήσεις από τρεις ζεύξεις που λειτουργούσαν στα 32 GHz.

Μια ερευνητική ομάδα ασχολήθηκε με τη διερεύνηση τη κατάστασης, των προκλήσεων και των προοπτικών της χρήσης των CMLs για την παρακολούθηση της βροχής [93]. Η μελέτη τους εξέτασε τις δυνατότητες των CMLs ως ευκαιριακών αισθητήρων για την εκτίμηση της βροχής, τονίζοντας τα πλεονεκτήματά τους όσον αφορά την υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Οι προκλήσεις που εξετάστηκαν περιλάμβαναν την ανάγκη ακριβούς βαθμονόμησης, την επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων και την ενσωμάτωση με άλλα δεδομένα παρατήρησης. Οι προοπτικές που συζητήθηκαν αφορούσαν τις εξελίξεις στις τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων και τη δυνητική επέκταση των δικτύων CMLs για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση του καιρού.

Μελέτες σχετικές με την εκτίμηση άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων μέσω μικροκυματικών ζεύξεων

Ορισμένες μελέτες, αν και λιγοστές στο σύνολό τους, έχουν εξετάσει και τη συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης σήματος και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων, πέρα της βροχής. Στο άρθρο [94], διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων και μετρήσεων ισχύος σήματος, με βάση ζεύξεις εξωτερικού χώρου που λειτουργούσαν στα 2.4 GHz. Οι μετεωρολογικές παράμετροι ήταν η θερμοκρασία, η απόλυτη υγρασία, η βροχή και η ηλιακή ακτινοβολία. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία ήταν ο πιο κυρίαρχος παράγοντας συσχέτισης.

Παρομοίως στο άρθρο [95], εξετάστηκαν μετρήσεις ισχύος σήματος συχνότητας 2.4 GHz από δίκτυα αισθητήρων σε εξωτερικούς χώρους, και εντοπίστηκε συσχέτιση μεταξύ της ισχύος σήματος και της απόλυτης υγρασίας, καθώς και της θερμοκρασίας, ενώ η σχετική υγρασία είχε μικρότερη επίδραση στο σήμα.

Επιπλέον, στα πλαίσια της μελέτης [96], διερευνήθηκαν αισθητήρες εξωτερικού χώρου, συχνότητας λειτουργία και πάλι 2.4 GHz, με τις εξεταζόμενες παραμέτρους να είναι η ανάπτυξη της βλάστησης, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η απόλυτη υγρασία. Στη μελέτη αυτή παρατηρήθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της ισχύος του σήματος και της ανάπτυξης της βλάστησης, αλλά και με τη θερμοκρασία και την απόλυτη υγρασία.

Κάποιες σχετικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί και στη συχνότητα LoRa (Long Range, Μεγάλης Εμβέλειας), των 868 MHz. Συγκεκριμένα στο άρθρο [97], έγινε συσχέτιση μεταξύ μετρήσεων RSSI (Received Signal Strength Indicator, Δείκτης Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος) και της υγρασίας του εδάφους. Ένα νευρωνικό δίκτυο μακράς βραχύχρονης μνήμης εκπαιδεύτηκε για να εκτιμήσει την υγρασία του εδάφους με βάση την ισχύ του σήματος, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια.

Στην έρευνα που παρουσιάζεται στο άρθρο [98], ένα δίκτυο αισθητήρων εσωτερικού χώρου που λειτουργούσε στη συχνότητα των 868 MHz χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της επίδρασης τόσο της θερμοκρασίας όσο και της απόλυτης υγρασίας στο RSSI. Η μελέτη διαπίστωσε ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ του RSSI και της θερμοκρασίας για αποστάσεις δέκτη-πομπού μεγαλύτερες από 5 m, ενώ παρατηρήθηκε επίσης ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ του RSSI και της σχετικής υγρασίας.

Τέλος, στη μελέτη [99], ένα υπαίθριο δίκτυο αισθητήρων LoRa χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις RSSI και παρατηρήθηκε εμφανής συσχέτιση με τη θερμοκρασία και την απόλυτη υγρασία.

1.9 Σκοπός της διατριβής

Όπως φαίνεται και από όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.8.2, η συντριπτική πλειοψηφία της έρευνας που αφορά την εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος σε μικροκομματικές ζεύξεις, αναφέρεται σε ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10 GHz. Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι να συνεισφέρει στο συγκεκριμένο αντικείμενο, ωστόσο μέσω πειραματικών δεδομένων για χαμηλότερες συχνότητες. Οι συχνότητες της περιοχής κάτω των 10 GHz χρησιμοποιούνται ευρέως από αμέτρητα πρωτόκολλα επικοινωνιών. Η μελέτη της διατριβής περιλαμβάνει δύο τρόπους διεξαγωγής μετρήσεων ισχύος σήματος. Ο πρώτος τρόπος αφορά μετρήσεις εντός του δικτύου 4G/LTE, συγκεκριμένα στη συχνότητα των 2630 MHz, μέσω της ανάπτυξης μιας κατάλληλης εφαρμογής Android για την καταγραφή της ισχύος λαμβανόμενου σήματος από μια κινητή συσκευή. Ο δεύτερος τρόπος αφορά μετρήσεις ισχύος μέσω της υλοποίησης μιας εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης, η οποία απαρτίζεται από έναν πομπό και έναν δέκτη υψηλής ακρίβειας. Το σύστημα του δέκτη περιλαμβάνει μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία

με βασικούς συντονισμούς στα 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Οι συχνότητες αυτές αποτελούν και το επίκεντρο της διερεύνησης της εξασθένησης σήματος λόγω της βροχής μέσω της πειραματικής διάταξης. Επιπλέον, καθώς οι μελέτες που αφορούν τη συσχέτιση μεταξύ εξασθένησης σήματος και άλλων παραγόντων εκτός της βροχής είναι λίγες, στα πλαίσια της διατριβής εξετάζεται και η πιθανή συσχέτιση της εξασθένησης σήματος με διάφορες άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους.

Τα επόμενα κεφάλαια της διατριβής είναι οργανωμένα ως εξής: Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η εφαρμογή Android που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή δεδομένων ισχύος σήματος από μια κινητή συσκευή. Στο Κεφάλαιο 3 ακολουθεί η περιγραφή της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης, και στη συνέχεια, το Κεφάλαιο 4 αφορά την επαναπροσδιοριζόμενη κεραία που υλοποιήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα του δέκτη της πειραματικής διάταξης. Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από μετρήσεις τόσο μέσω της εφαρμογής Android όσο και μέσω της πειραματικής διάταξης περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 5. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και συζητούνται κάποιες πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις.

Υλοποίηση Εφαρμογής Android για την Καταγραφή της Ισχύος Σήματος

2.1 Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή, η χρήση κινητών τηλεφώνων είναι ευρέως διαδεδομένη. Κατ' επέκταση, η αντίστοιχη υποδομή βρίσκεται επίσης σε αφθονία, προσφέροντας υψηλή χωρική κάλυψη όσον αφορά την παρουσία σταθμών βάσης που χρησιμοποιούνται για τις τηλεπικοινωνίες. Είναι επομένως ενδιαφέρον το αν σε μια ζεύξη μεταξύ ενός πομποδέκτη κάποιου σταθμού βάσης και μιας κινητής συσκευής μπορεί να αξιοποιηθεί η ισχύς σήματος για την εκτίμηση της έντασης της βροχής. Για τον σκοπό αυτόν, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μια εφαρμογή Android η οποία να μετράει την ισχύ λαμβανόμενου σήματος από ένα κινητό τηλέφωνο και έπειτα να την καταγράφει ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η εφαρμογή υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του ολοκληρωμένου αναπτυξιακού περιβάλλοντος Android Studio, και η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Kotlin, που αποτελεί πλέον την προτεινόμενη γλώσσα για την ανάπτυξη εφαρμογών Android.

2.2 Το λειτουργικό σύστημα Android

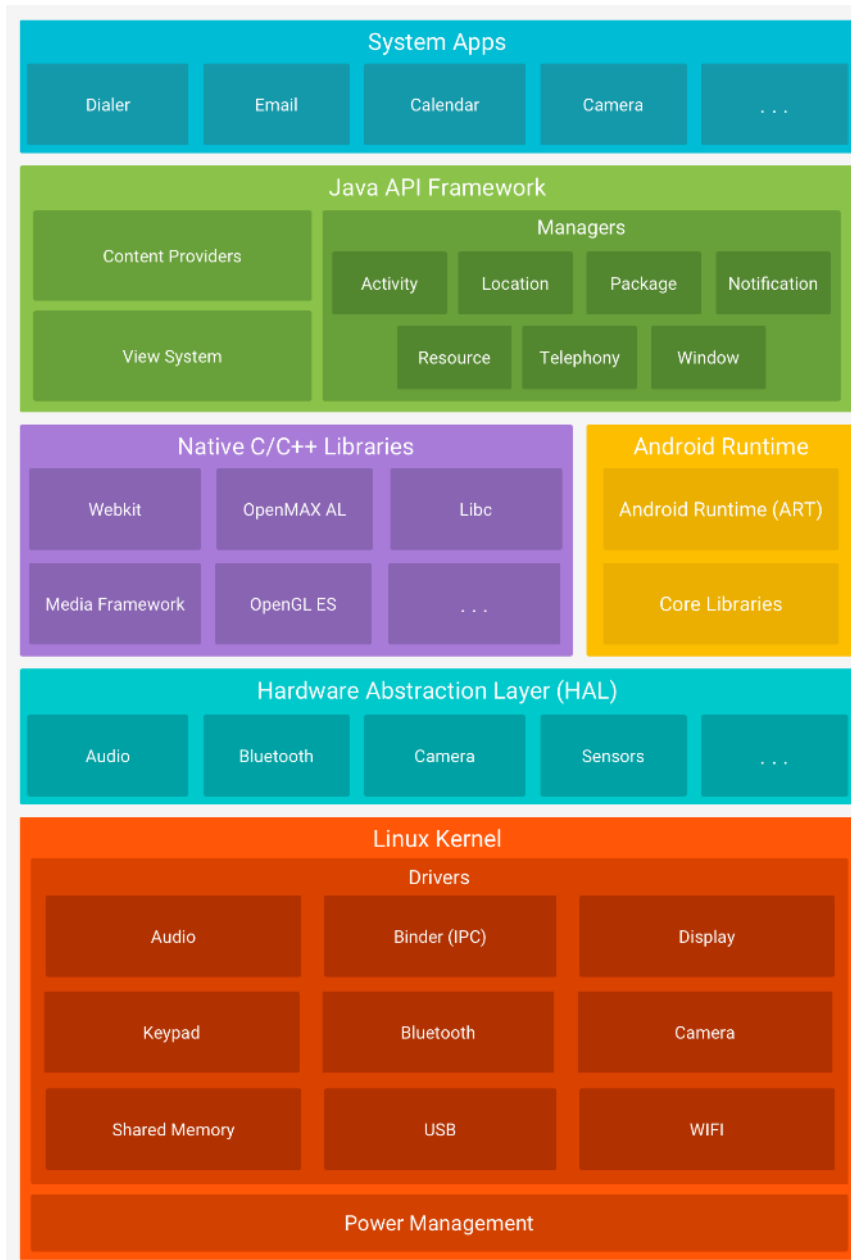
Το λειτουργικό σύστημα Android, που ξεκίνησε από το όραμα του Andy Rubin και αναπτύχθηκε από την Android Inc., έχει φέρει επανάσταση στον κλάδο των κινητών τηλεφώνων από την ίδρυσή του. Το 2005 το Android πέρασε στα χέρια της Google και σήμερα έχει πλέον εξελιχθεί σε μια ευέλικτη και πανταχού παρούσα πλατφόρμα, η οποία χρησιμοποιείται από δισεκατομμύρια smartphones, tablets, wearables και άλλες έξυπνες συσκευές παγκοσμίως.

Η απαρχή του Android μπορεί να εντοπιστεί πίσω στο 2003, όταν ο Andy Rubin, ο Rich Miner, ο Nick Sears και ο Chris White ίδρυσαν την Android Inc. με σκοπό την ανάπτυξη ενός προηγμένου λειτουργικού συστήματος για ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Ωστόσο, αντιλαμβανόμενοι τις δυνατότητες στην αναπτυσσόμενη αγορά των smartphones, το ενδιαφέρον τους μετατοπίστηκε στη δημιουργία μιας πλατφόρμας για κινητά τηλέφωνα. Το 2005, η Google εξαγόρασε την Android Inc. θέτοντας τις βάσεις για την εμφάνιση ενός από τα πιο καθοριστικά λειτουργικά συστήματα της σημερινής εποχής. Η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη

Κεφάλαιο 2: Υλοποίηση Εφαρμογής Android για την Καταγραφή της Ισχύος Σήματος

συσκευή Android, το HTC Dream (επίσης γνωστό ως T-Mobile G1), κυκλοφόρησε το 2008, σηματοδοτώντας την αρχή της πορείας του Android προς την κυρίαρχη θέση.

Το Android βασίζεται σε λογισμικό ανοιχτού κώδικα (open source) το οποίο αναφέρεται συχνά και ως Android Open Source Project (AOSP). Στην καρδιά του, τρέχει τον πυρήνα του Linux (Linux Kernel), που παρέχει ένα ισχυρό και ασφαλές θεμέλιο για τις λειτουργίες του. Η αρχιτεκτονική του Android έχει σχεδιαστεί με μια πολυεπίπεδη προσέγγιση η οποία φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [100].



Σχήμα 2.1: Η αρχιτεκτονική του λειτουργικού συστήματος Android.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.1, η αρχιτεκτονική του λειτουργικού συστήματος Android βασίζεται στα εξής επίπεδα:

- **Linux Kernel:** Αποτελεί τη βάση του συστήματος Android. Ενδεικτικά, το Android Runtime (ART) εξαρτάται από τον πυρήνα του Linux για την εκτέλεση βασικών λειτουργιών, όπως η διαχείριση νημάτων και μνήμης χαμηλού επιπέδου. Η χρήση ενός πυρήνα Linux επιτρέπει στο Android να χρησιμοποιεί σημαντικά μέτρα ασφαλείας και στους κατασκευαστές υλικού να δημιουργούν προγράμματα οδήγησης (drivers) για έναν ευρέως αναγνωρισμένο πυρήνα.
- **Hardware Abstraction Layer (HAL):** Παρέχει τυποποιημένες διεπαφές που προσφέρουν τις δυνατότητες του υλικού της συσκευής στο υψηλότερο επίπεδο Java API Framework. Το HAL αποτελείται από πολλαπλές βιβλιοθήκες, καθεμία από τις οποίες υλοποιεί μια διεπαφή για έναν συγκεκριμένο τύπο υλικού, όπως η κάμερα ή το Bluetooth. Όταν ένα API του Java Framework αιτείται την πρόσβαση στο υλικό της συσκευής, το σύστημα Android φορτώνει τη βιβλιοθήκη για το συγκεκριμένο μέρος του υλικού.
- **Android Runtime (ART):** Για συσκευές που τρέχουν Android 5.0 (επίπεδο API 21) ή νεότερη έκδοση, κάθε εφαρμογή εκτελείται σε δική της διεργασία και με το δικό της instance του Android Runtime. Το ART είναι σχεδιασμένο για να εκτελεί πολλαπλά εικονικά συστήματα σε συσκευές με χαμηλή μνήμη, εκτελώντας αρχεία Dalvik Executable (DEX), μια μορφή κωδικοποίησης byte που έχει σχεδιαστεί ειδικά για το Android και είναι βελτιστοποιημένη για την ελάχιστη δέσμευση μνήμης. Τα εργαλεία κατασκευής (build tools), όπως το d8, μεταγλωττίζουν τον κώδικα μιας εφαρμογής σε κωδικοποίηση DEX, η οποία μπορεί να εκτελεστεί από το σύστημα Android.
- **Native C/C++ Libraries:** Πολλά βασικά στοιχεία και υπηρεσίες του συστήματος Android, όπως το ART και το HAL, είναι κατασκευασμένα από native κώδικα (κώδικας που μεταγλωττίζεται και τρέχει απευθείας στο σύστημα χωρίς τη μεσολάβηση επιπλέον βημάτων) που απαιτεί native βιβλιοθήκες γραμμένες σε C και C++. Η πλατφόρμα Android παρέχει APIs του Java Framework για την προσφορά της λειτουργικότητας ορισμένων από αυτές τις native βιβλιοθήκες στις εφαρμογές.
- **Java API Framework:** Οι προγραμματιστές έχουν πλήρη πρόσβαση στις δυνατότητες του Android μέσω των APIs του Java Framework, που διευκολύνουν τη δημιουργία αποτελεσματικών εφαρμογών. Αυτά τα APIs χρησιμεύουν ως η βάση για την ανάπτυξη εφαρμογών, παρέχοντας μια απλοποιημένη προσέγγιση μέσα από την ύπαρξη επαναχρησιμοποιήσιμων στοιχείων συστήματος. Με δυνατότητες όπως η δημιουργία στοιχείων διεπαφής χρήστη UI (user interface), η διαχείριση πόρων, ο χειρισμός ειδοποιήσεων, η διαχείριση κύκλου ζωής δραστηριοτήτων και η ενσωμάτωση παρόχων περιεχομένου για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών, οι προγραμματιστές μπορούν να δημιουργήσουν πλούσιες σε χαρακτηριστικά εφαρμογές.

- System Apps: Το Android διαθέτει ένα σύνολο βασικών εφαρμογών συστήματος για ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, μηνύματα SMS, ημερολόγια, περιήγηση στο διαδίκτυο, επαφές και πολλά άλλα. Στην πλειοψηφία τους οι εφαρμογές αυτές μπορούν να αντικατασταθούν από άλλες αν το επιθυμεί ο χρήστης.

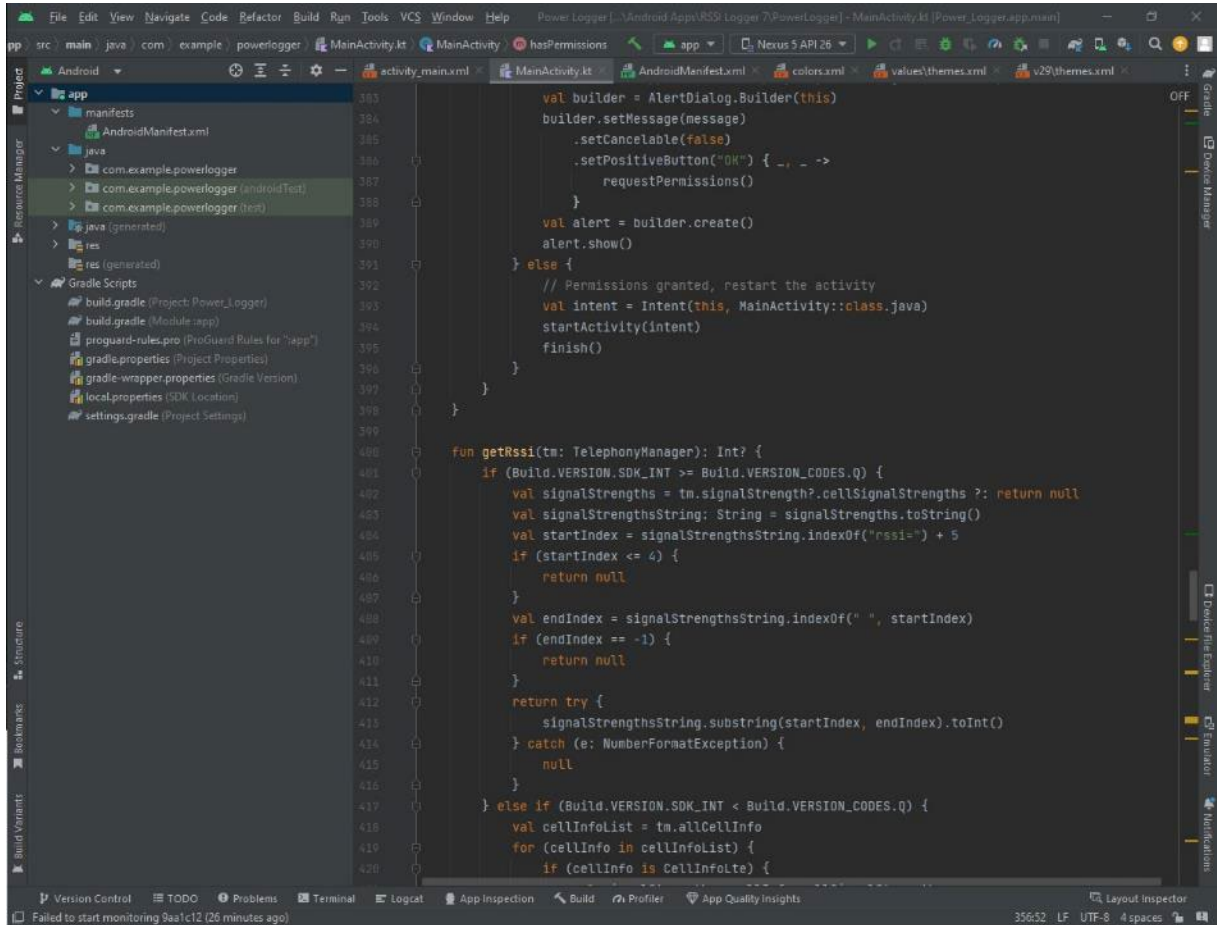
Το Android φημίζεται για την πληθώρα χαρακτηριστικών του που απευθύνονται τόσο στους απλούς χρήστες όσο και στους προγραμματιστές. Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του λειτουργικού συστήματος Android περιλαμβάνουν τη φύση του ως λειτουργικό σύστημα ανοιχτού κώδικα, την προσαρμόσιμη διεπαφή χρήστη, την ευκολία ως προς την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών εφαρμογών, τα ισχυρά μέτρα ασφαλείας και την απρόσκοπτη διασύνδεση με διάφορες υπηρεσίες Google [101].

2.3 Το αναπτυξιακό περιβάλλον Android Studio

Το Android Studio αποτελεί το επίσημο ολοκληρωμένο αναπτυξιακό περιβάλλον (IDE) για την ανάπτυξη εφαρμογών Android. Είναι βασισμένο στον επεξεργαστή κώδικα του περιβάλλοντος IntelliJ IDEA και έχει ενσωματώσει πολλές επιπλέον λειτουργίες για την ενίσχυση της παραγωγικότητας. Μερικές από αυτές είναι:

- Ένα σύστημα κατασκευής (build system) που βασίζεται στο Gradle.
- Ένας ισχυρός προσομοιωτής συσκευών Android με πολλές δυνατότητες.
- Ένα ενοποιημένο περιβάλλον για την πλήρη ανάπτυξη εφαρμογών για κάθε συσκευή Android.
- Δυνατότητα οι τροποποιήσεις στον κώδικα της εφαρμογής να φαίνονται σε πραγματικό χρόνο χωρίς να απαιτείται η επανεκκίνησή της.
- Πρότυπα από κώδικες και διασύνδεση με το GitHub για την εύκολη ανάπτυξη συνηθισμένων λειτουργιών και την εισαγωγή παραδειγμάτων κώδικα.
- Ένα σύνολο από εργαλεία για τον έλεγχο της λειτουργικότητας της εφαρμογής.
- Εργαλεία για τον έλεγχο της αποδοτικότητας, χρηστικότητας, συμβατότητας και άλλων προβλημάτων.
- Υποστήριξη C++ και NDK (Native Development Kit).
- Υποστήριξη της πλατφόρμας Google Cloud (GCP, Google cloud platform) η οποία διευκολύνει την ενσωμάτωση μηχανών που είναι απαραίτητες για εφαρμογές διαδικτύου.

Συνολικά, το Android Studio αποτελεί ένα ευέλικτο IDE, που εξοπλίζει τους προγραμματιστές με τα απαραίτητα εργαλεία και πόρους για την αποτελεσματική δημιουργία εφαρμογών Android υψηλής ποιότητας. Η απρόσκοπτη διασύνδεσή του με το οικοσύστημα του Android, το ολοκληρωμένο σύνολο λειτουργιών και τα ισχυρά εργαλεία ανάπτυξης το καθιστούν την προτιμώμενη επιλογή για την ανάπτυξη εφαρμογών Android. Στο Σχήμα 2.2 ακολουθεί μια εικόνα του περιβάλλοντος Android Studio.



Σχήμα 2.2: Όψη του περιβάλλοντος Android Studio.

Στο πάνω μέρος του Android Studio, υπάρχει ένα μενού που επιτρέπει την πρόσβαση σε μια πληθώρα λειτουργιών. Κάποιες βασικές ενέργειες που μπορεί να εκτελέσει κανείς από εκεί είναι η δημιουργία ενός νέου project ή το άνοιγμα ενός ήδη υπάρχοντος και η αποθήκευση αυτού μετά από τροποποιήσεις. Επιπλέον, από εκεί μπορεί να γίνει build η εφαρμογή, να κατασκευαστούν αρχεία APK (Android package kit), καθώς και να εγκατασταθεί η εφαρμογή απευθείας σε μια συσκευή Android με την απλή σύνδεσή της στον υπολογιστή μέσω USB. Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει και η εγκατάσταση και εκκίνηση μιας εικονικής συσκευής Android, στην οποία μπορεί μετέπειτα να εγκατασταθεί η εφαρμογή χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση μιας πραγματικής συσκευής. Αυτό επιτρέπει να ελέγχει κανείς τη λειτουργικότητα της εφαρμογής σε διαφορετικές εκδόσεις του λειτουργικού συστήματος Android.

Κάθε project στο Android Studio αποτελείται από ένα σύνολο αρχείων κώδικα καθώς και αρχείων πόρων όπου περιλαμβάνονται εικόνες, χρώματα κλπ. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, στο αριστερό μέρος του Android Studio εμφανίζεται ένα σύνολο φακέλων οι οποίοι περιέχουν όλα τα αρχεία της εφαρμογής, κάτι που διευκολύνει τη γρήγορη πρόσβαση στα πιο σημαντικά από αυτά. Στο δεξιό μέρος φαίνεται το περιεχόμενο ενός επιλεγμένου αρχείου. Οι φάκελοι αυτοί αντιστοιχούν σε ένα module που ονομάζεται app. Στο ίδιο σημείο, έπειτα από

αυτό το module περιλαμβάνονται επίσης και όλα τα αρχεία Gradle που σχετίζονται με το build της εφαρμογής. Κάθε app module εμπεριέχει τους εξής βασικούς φακέλους:

- manifests: Περιλαμβάνει το αρχείο AndroidManifest.xml. Το αρχείο αυτό περιγράφει βασικές πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή στα εργαλεία build του Android, στο λειτουργικό σύστημα Android, καθώς και στο Google Play. Μεταξύ άλλων, το αρχείο manifest είναι απαραίτητο να ορίζει διάφορα μέρη της εφαρμογής όπως δραστηριότητες, υπηρεσίες κλπ., να ορίζει επίσης όλες τις άδειες που χρειάζεται η εφαρμογή, καθώς και τις απαιτήσεις υλικού και λογισμικού, κάτι που καθορίζει ποιες συσκευές μπορούν να εγκαταστήσουν την εφαρμογή από το Google Play.
- java: Περιλαμβάνει αρχεία με τους κυρίως κώδικες Java και Kotlin που ορίζουν την όλη λειτουργία της εφαρμογής.
- res: Περιέχει αρχεία πόρων εκτός κώδικα, δηλαδή αρχεία εικόνων, χρωμάτων, κειμένου που μπορεί να εμφανίζεται στην εφαρμογή κλπ.

Η δομή των αρχείων της εφαρμογής στον δίσκο του υπολογιστή διαφέρει από την απεικόνιση στο σημείο αυτό του Android Studio, όπου έχουν οργανωθεί με τρόπο που να προσφέρει εύκολη προσβασιμότητα για τον χρήστη. Αν κανείς επιθυμεί να δει την πραγματική δομή του project, τότε στο μέρος πάνω από την παρουσίαση της δομής θα πρέπει αντί για Android να επιλέξει Project.

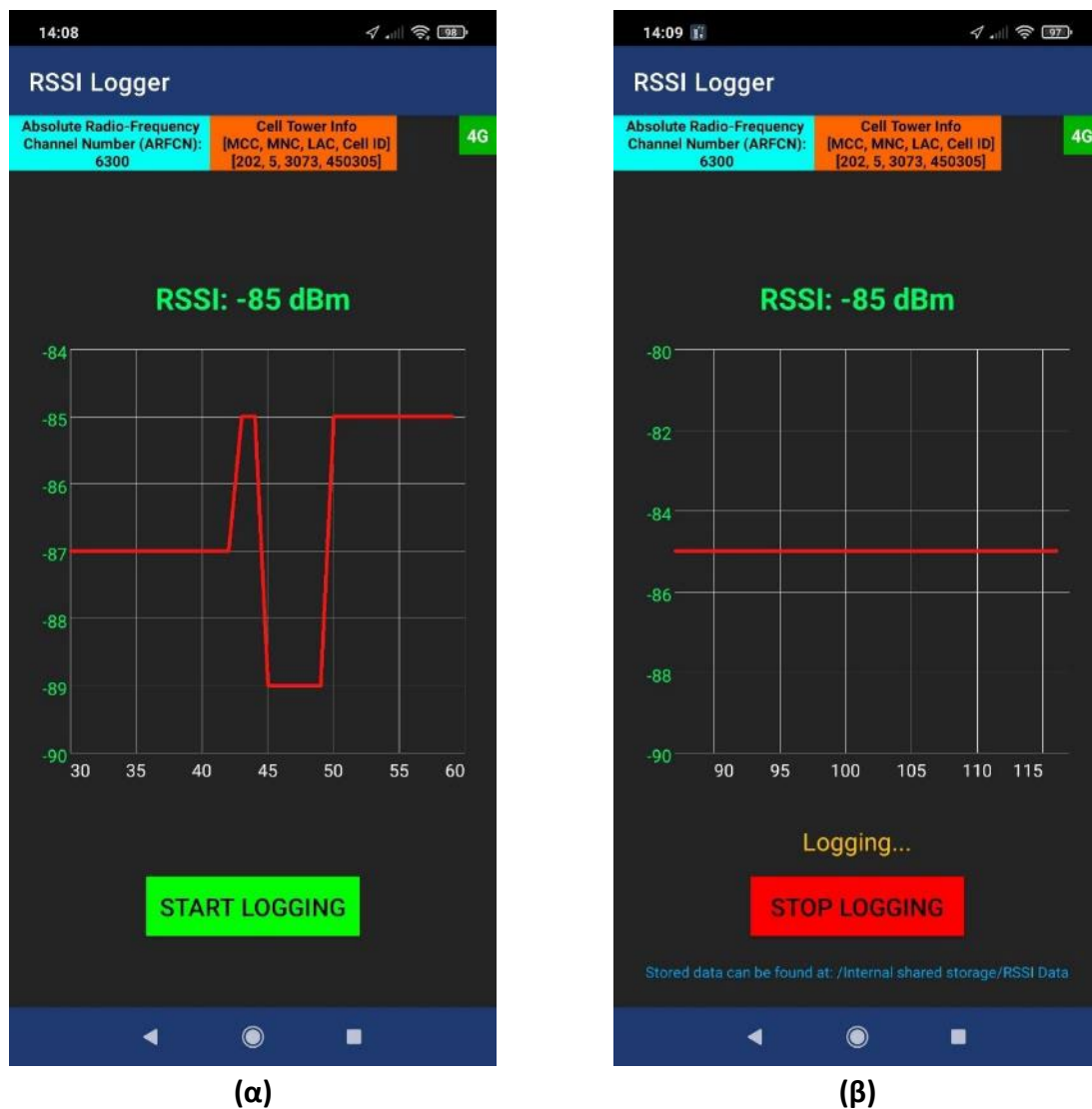
Το Android Studio χρησιμοποιεί το Gradle ως τη βάση του συστήματος build. Το σύστημα αυτό τρέχει ως ένα ενσωματωμένο στο Android Studio εργαλείο από το μενού του ή και ανεξάρτητα από τη γραμμή εντολών. Προσφέρει τη δυνατότητα προσαρμογής και επέκτασης της διαδικασίας build, καθώς και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης κώδικα ή πόρων μεταξύ διαφορετικών εκδόσεων της εφαρμογής. Επιτρέπει επίσης τη δημιουργία πολλαπλών αρχείων APK για την εφαρμογή με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας το ίδιο ακριβώς project [102].

2.4 Ανάπτυξη της εφαρμογής

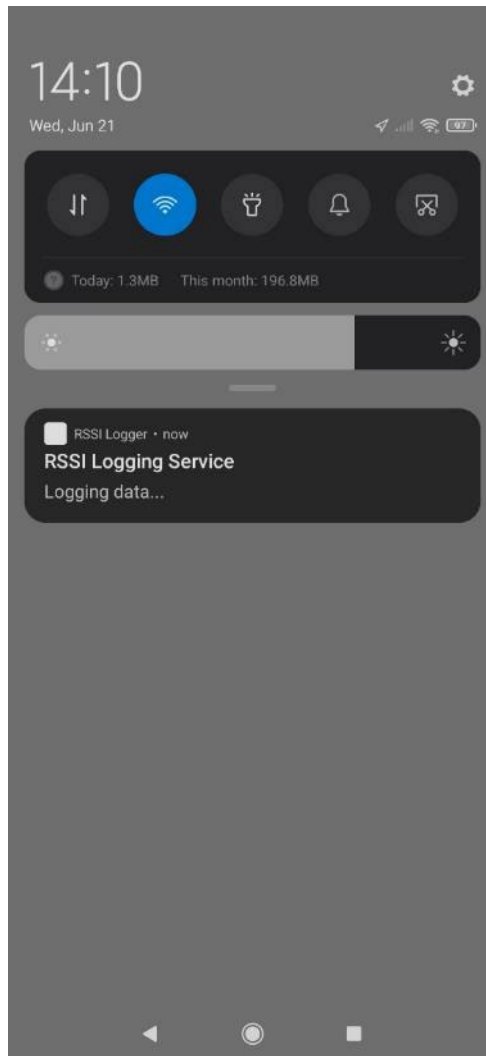
Η εφαρμογή Android που αναπτύχθηκε για τη δυνατότητα καταγραφής της ισχύος σήματος που λαμβάνει ένα κινητό τηλέφωνο από έναν σταθμό βάσης του δικτύου κινητών επικοινωνιών, προσφέρει ένα απλό γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI, graphical user interface) για την εύκολη χρήση της. Η λειτουργικότητα της εφαρμογής εξετάστηκε σε συσκευές Android που έτρεχαν από Android 6 έως και Android 10, ενώ για τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν μέσω αυτής χρησιμοποιήθηκε τελικά μια συσκευή που έτρεχε Android 8, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5. Στη συνέχεια περιγράφεται το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής, καθώς και γενικότερα η λειτουργία της.

2.4.1 Τα κύρια χαρακτηριστικά της εφαρμογής

Η εφαρμογή μπορεί να καταγράφει σε αρχεία κειμένου τις μετρήσεις της ισχύος σήματος, η οποία αναφέρεται ως RSSI (Received Signal Strength Indicator), κάθε 10 δευτερόλεπτα. Λόγω περιορισμών που επιβάλλονται ξεκινώντας από το Android 8 και επόμενες εκδόσεις σε εφαρμογές που τρέχουν συνεχώς στο παρασκήνιο, η λειτουργία καταγραφής δεδομένων από την εφαρμογή υλοποιήθηκε ως υπηρεσία. Με την προσέγγιση αυτή η πιθανότητα τερματισμού της εφαρμογής από το σύστημα Android ελαχιστοποιείται, κάτι που επιτρέπει στην εφαρμογή την ανεμπόδιστη καταγραφή δεδομένων για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. Όταν η υπηρεσία αυτή είναι ενεργή, μια ειδοποίηση εμφανίζεται στον χρήστη μέσω της μπάρας ειδοποιήσεων του συστήματος Android. Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα 2.3, ενώ η ειδοποίηση που εμφανίζεται όταν καταγράφονται ενεργά δεδομένα RSSI φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.3: Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής Android όταν η υπηρεσία καταγραφής δεδομένων είναι (α) απενεργοποιημένη ή (β) ενεργοποιημένη.



Σχήμα 2.4: Η ειδοποίηση που εμφανίζεται στη μπάρα ειδοποιήσεων μιας συσκευής Android όταν η υπηρεσία καταγραφής δεδομένων RSSI είναι ενεργή.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η εφαρμογή εμφανίζει την τελευταία τιμή RSSI στην οθόνη, ενώ παράλληλα περιλαμβάνει μια γραφική απεικόνιση των 30 πιο πρόσφατων τιμών. Η τιμή αυτή εκφράζεται σε μονάδες dBm και αναβαθμίζεται κάθε δευτερόλεπτο. Κάθε μια από τις τιμές RSSI προστίθεται στο γράφημα.

Στο πάνω μέρος της οθόνης απεικονίζεται ο απόλυτος αριθμός καναλιού RF (ARFCN, Absolute Radio Frequency Channel Number), ο οποίος είναι απαραίτητος για τον προσδιορισμό της συχνότητας λήψης δεδομένων στη συσκευή Android που προέρχονται από κάποιον σταθμό βάσης (downlink), καθώς και αντίστροφα, για τον προσδιορισμό της συχνότητας αποστολής δεδομένων από τη συσκευή Android προς τον σταθμό βάσης (uplink). Για τους σκοπούς της διατριβής μόνο η συχνότητα λήψης δεδομένων από τη συσκευή Android ήταν απαραίτητη.

Δεξιά του αριθμού αυτού απεικονίζονται τέσσερις ακόμα τιμές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση του σταθμού βάσης με τον οποίο είναι συνδεδεμένη

η κινητή συσκευή. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει κάνεις να αναζητήσει τον σταθμό βάσης σε τοπικές βάσεις δεδομένων μέσω των αναγραφόμενων τιμών. Οι τιμές αυτές είναι συγκεκριμένα ο κωδικός χώρας κινητής τηλεφωνίας (MCC, Mobile Country Code), ο κωδικός δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MNC, Mobile Network Code), ο κωδικός περιοχής θέσης (LAC, Location Area Code), καθώς και η ταυτότητα κυττάρου (Cell ID ή CID, Cell Identity). Ο αριθμός MCC είναι τριψήφιος και η τιμή του προσδιορίζει μια μοναδική χώρα στη διεθνή ταυτότητα κινητού συνδρομητή (IMSI, International Mobile Subscriber Identity). Χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση μιας συγκεκριμένης χώρας σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Ο MNC είναι ένας διψήφιος ή τριψήφιος κωδικός που, όταν συνδυάζεται με τον MCC, προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας που λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη χώρα. Βοηθά στη διάκριση μεταξύ διαφορετικών παρόχων κινητής τηλεφωνίας εντός μιας χώρας. Ο LAC χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό μιας περιοχής θέσης εντός ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Οι περιοχές αυτές είναι ομάδες κυψελών και ο αριθμός LAC βοηθά στη διαχείριση και οργάνωση της παρακολούθησης των κινητών συσκευών όταν αυτές κινούνται μεταξύ διαφορετικών περιοχών του δικτύου. Τέλος, η ταυτότητα κυττάρου είναι ένας μοναδικός αριθμός που προσδιορίζει μια συγκεκριμένη κυψέλη (περιοχή που καλύπτεται από κάποιον πομπό ή δέκτη) εντός ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Κάθε κυψέλη σε ένα δίκτυο διαθέτει έναν μοναδικό αριθμό ταυτότητας, επιτρέποντας στο δίκτυο να εντοπίζει τη θέση μιας κινητής συσκευής με βάση την κυψέλη στην οποία είναι συνδεδεμένη.

Στην επάνω δεξιά πλευρά της εφαρμογής εμφανίζεται επίσης ο τύπος δικτύου. Τα υποστηριζόμενα δίκτυα για τα οποία η εφαρμογή έχει σχεδιαστεί να μετράει αποτελεσματικά το RSSI είναι δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς, δηλαδή, όπως είναι γνωστά, 2G, 3G και 4G. Αυτή είναι και η ένδειξη που εμφανίζεται σε αυτήν την περιοχή.

Στο κάτω μέρος της εφαρμογής υπάρχει η επιλογή "START LOGGING". Εάν ο χρήστης πατήσει πάνω της τότε ξεκινάει η διαδικασία καταγραφής μετρήσεων RSSI με την ενεργοποίηση της αντίστοιχης υπηρεσίας, και εμφανίζεται στον χρήστη η ειδοποίηση που αναφέρθηκε προηγουμένως και η οποία φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Όλες οι πληροφορίες που περιγράφηκαν παραπάνω και εμφανίζονται στην οθόνη καταγράφονται κάθε 10 δευτερόλεπτα εντός ενός αρχείου κειμένου (txt) το οποίο κατασκευάζεται και αποθηκεύεται στην εσωτερική μνήμη της συσκευής Android. Επιπρόσθετα, κάθε φορά προστίθεται στο αρχείο και η αντίστοιχη ώρα κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η καταγραφή. Ένα νέο αρχείο κατασκευάζεται σε καθημερινή βάση και η ημερομηνία χρησιμοποιείται ως όνομα για αυτό. Το μονοπάτι που πρέπει να ακολουθήσει κανείς για να εντοπίσει το αρχείο στην εσωτερική μνήμη της συσκευής εμφανίζεται στο κάτω μέρος της εφαρμογής όταν η υπηρεσία καταγραφής δεδομένων RSSI είναι ενεργή. Κατά τη διάρκεια καταγραφής δεδομένων η ένδειξη "START LOGGING" αλλάζει και στη θέση της εμφανίζεται η ένδειξη "STOP LOGGING". Εάν ο χρήστης πατήσει πάνω σε αυτήν τότε εμφανίζεται και πάλι η ένδειξη "START LOGGING" και η υπηρεσία καταγραφής δεδομένων RSSI τερματίζεται. Έτσι η εφαρμογή επιστρέφει στην κατάσταση όπου απλά εμφανίζονται τιμές RSSI στην οθόνη χωρίς αυτές να αποθηκεύονται

Κεφάλαιο 2: Υλοποίηση Εφαρμογής Android για την Καταγραφή της Ισχύος Σήματος

στα αρχεία στη μνήμη της συσκευής. Όσον αφορά την ακρίβεια των μετρήσεων RSSI, εξαρτάται από την χρησιμοποιούμενη συσκευή. Η συσκευή Android που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής για την διεξαγωγή των μετρήσεων που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5 προσέφερε ακρίβεια 1 dB στις μετρήσεις RSSI. Στον Πίνακα 2.1 περιλαμβάνεται ένα τμήμα ενός λεπτού μετρήσεων RSSI που δείχνει το πραγματικό περιεχόμενο ενός αρχείου καταγραφής.

Πίνακας 2.1: Παράδειγμα μετρήσεων ενός λεπτού που έγιναν μέσω της εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες, όπως αυτές καταγράφηκαν σε ένα αρχείο κειμένου.

RSSI	Channel	Network	MCC	MNC	LAC	CID	Time
-78	2850	4G	202	5	4060	230153	19:41:44
-78	2850	4G	202	5	4060	230153	19:41:54
-78	2850	4G	202	5	4060	230153	19:42:04
-78	2850	4G	202	5	4060	230153	19:42:14
-78	2850	4G	202	5	4060	230153	19:42:24
-78	2850	4G	202	5	4060	230153	19:42:34
-78	2850	4G	202	5	4060	230153	19:42:44

Για τους σκοπούς της διατριβής η εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις μόνο εντός του δικτύου 4G/LTE (4th Generation / Long-Term Evolution). Στα πλαίσια ενός δικτύου 4G/LTE, ο αριθμός ARFCN αναγράφεται ως EARFCN (E-UTRA ARFCN ή Evolved Universal Terrestrial Radio Access ARFCN - ARFCN Εξελιγμένης Παγκόσμιας Επίγειας Ραδιοπρόσβασης). Μπορεί, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της συχνότητας φέροντος στην οποία λαμβάνει δεδομένα μια κινητή συσκευή από κάποιον σταθμό βάσης. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει μια σχέση η οποία ορίζεται στην ενότητα 5.7.3 της τεχνικής προδιαγραφής 3GPP TS 36.101 [103]. Η σχέση αυτή είναι η εξής:

$$F_{DL} = F_{DL_{low}} + 0.1(N_{DL} - N_{Offs-DL}), \quad (2.1)$$

όπου F_{DL} είναι η συχνότητα φέροντος κατά τη λήψη (downlink) εκφρασμένη σε MHz, και N_{DL} είναι η τιμή EARFCN. Επιπλέον, οι μεταβλητές $F_{DL_{low}}$ και $N_{Offs-DL}$ είναι, αντίστοιχα, η ελάχιστη τιμή της συχνότητας και του EARFCN εντός της μπάνας συχνοτήτων που ορίζεται από το N_{DL} . Τόσο η τιμή $F_{DL_{low}}$ όσο και η τιμή $N_{Offs-DL}$, μπορούν να βρεθούν εντός της τεχνικής προδιαγραφής 3GPP TS 36.101, στον πίνακα 5.7.3-1. Ο πίνακας αυτός έχει συμπεριληφθεί και στο Παράρτημα Α της διατριβής.

Στο παράδειγμα του Πίνακα 2.1, η τιμή του EARFCN είναι 2850. Για να υπολογίσει κανείς τη συχνότητα στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ανατρέξει στον πίνακα της τεχνικής προδιαγραφής και αρχικά να προσδιορίσει τον αριθμό της μπάνας συχνοτήτων βρίσκοντας σε ποιο εύρος τιμών N_{DL} ανήκει η συγκεκριμένη τιμή του EARFCN. Η στήλη με τα πιθανά εύρη τιμών ονομάζεται στον πίνακα "Range of N_{DL} ". Αφού προσδιοριστεί ο αριθμός της μπάνας

μπορούν να βρεθούν στον πίνακα και οι αντίστοιχες τιμές F_{DL_low} καθώς και $N_{Offs-DL}$. Εισάγοντας τις τιμές αυτές στην εξίσωση (2.1) μπορεί να υπολογιστεί η συχνότητα φέροντος κατά τη λήψη δεδομένων από την κινητή συσκευή. Ένα μέρος του πίνακα αυτού ακολουθεί στο Σχήμα 2.5, που περιλαμβάνει την περιοχή όπου αντιστοιχεί η τιμή EARFCN του προαναφερθέντος παραδείγματος.

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F_{DL_low} (MHz)	$N_{Offs-DL}$	Range of N_{DL}	F_{UL_low} (MHz)	$N_{Offs-UL}$	Range of N_{UL}
1	2110	0	0 – 599	1920	18000	18000 – 18599
2	1930	600	600 – 1199	1850	18600	18600 – 19199
3	1805	1200	1200 – 1949	1710	19200	19200 – 19949
4	2110	1950	1950 – 2399	1710	19950	19950 – 20399
5	869	2400	2400 – 2649	824	20400	20400 – 20649
6	875	2650	2650 – 2749	830	20650	20650 – 20749
7	2620	2750	2750 – 3449	2500	20750	20750 – 21449
8	925	3450	3450 – 3799	880	21450	21450 – 21799

Σχήμα 2.5: Το πρώτο μέρος του πίνακα καναλιών E-UTRA του δικτύου 4G/LTE για τον προσδιορισμό της συχνότητας φέροντος κατά τη λήψη (downlink) ή την εκπομπή (uplink) δεδομένων, όπως ορίζεται στην τεχνική προδιαγραφή 3GPP TS 31.101.

Σύμφωνα με τον πίνακα, η τιμή 2850 του EARFCN εμπεριέχεται στο σύνολο τιμών 2750 έως 3449, επομένως αντιστοιχεί στη μπάντα 7. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, για τη συγκεκριμένη μπάντα οι τιμές των F_{DL_low} και $N_{Offs-DL}$ είναι αντίστοιχα 2620 MHz και 2750. Εισάγοντας αυτές τις τιμές στη σχέση 2.1, η συχνότητα λήψης υπολογίζεται ίση με 2630 MHz.

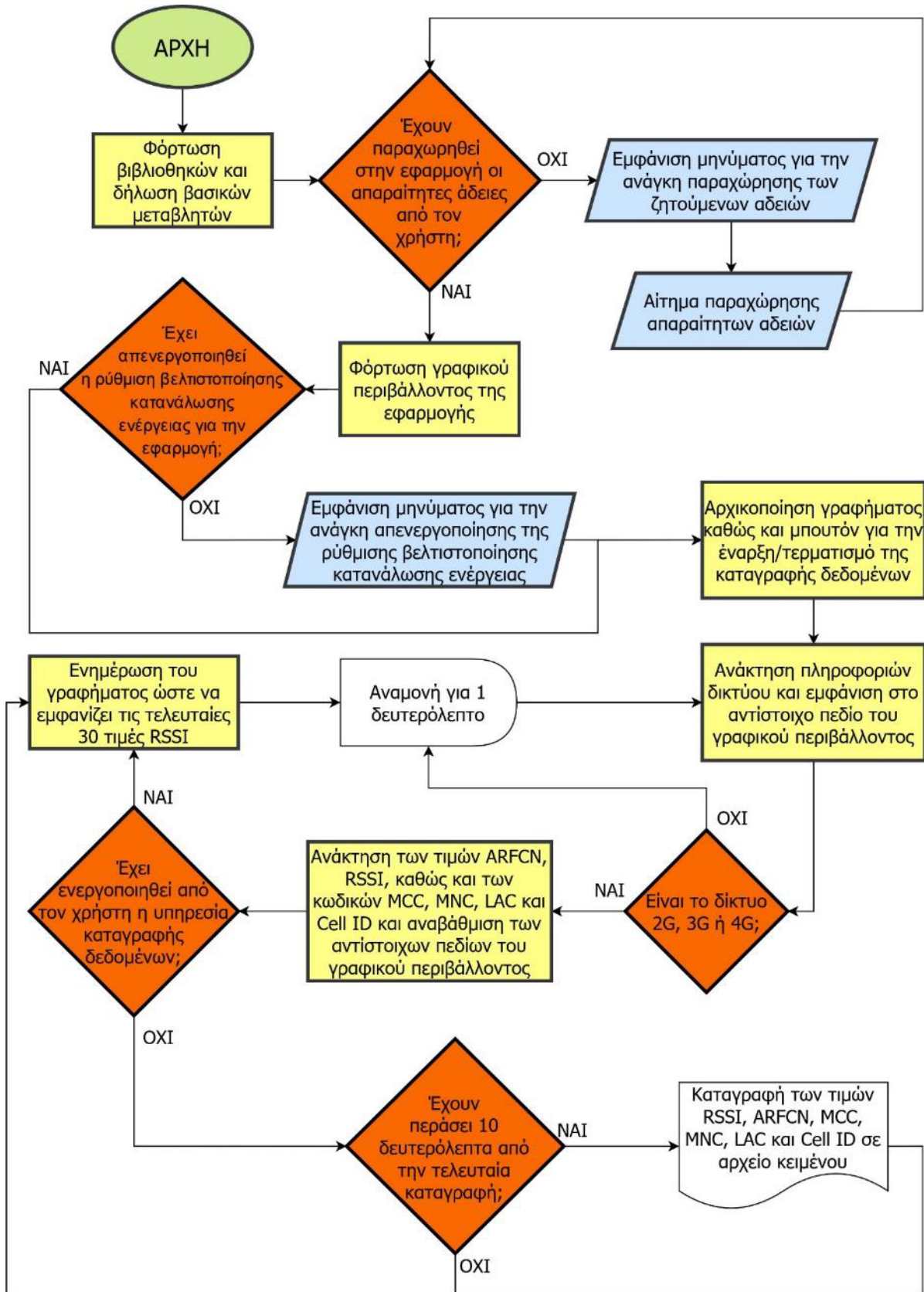
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.5, ο πίνακας της τεχνικής προδιαγραφής 3GPP TS 31.101 μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον και για τον προσδιορισμό της συχνότητας φέροντος κατά την εκπομπή (uplink). Για τον σκοπό αυτόν μπορεί κανείς να εκμεταλλευτεί μια σχέση αντίστοιχη με την 2.1, η οποία επίσης ορίζεται στο εσωτερικό της ίδιας τεχνικής προδιαγραφής. Η σχέση αυτή είναι η:

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0.1(N_{UL} - N_{Offs-UL}), \quad (2.2)$$

όπου F_{UL} είναι η συχνότητα φέροντος κατά την εκπομπή (uplink) εκφρασμένη σε MHz, και N_{UL} είναι η τιμή EARFCN. Επιπλέον, οι μεταβλητές F_{UL_low} και $N_{Offs-UL}$ είναι, αντίστοιχα, η ελάχιστη τιμή της συχνότητας και του EARFCN εντός της μπάντας συχνοτήτων που ορίζεται από το N_{UL} , και βρίσκονται από τον προαναφερθέντα πίνακα της τεχνικής προδιαγραφής. Για τους σκοπούς της διατριβής δεν ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός της συχνότητας εκπομπής από τη συσκευή Android. Για τα δίκτυα 2G και 3G θα πρέπει κανείς να ανατρέξει στις τεχνικές προδιαγραφές 3GPP TS 05.05 ή 45.005 [104,105] και 3GPP TS 25.101 [106] αντίστοιχα.

2.4.2 Ο κώδικας της εφαρμογής

Το διάγραμμα ροής των βασικών σημείων του κώδικα της εφαρμογής ακολουθεί στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής του κώδικα της εφαρμογής Android.

Οι βασικές βιβλιοθήκες

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.6 το πρώτο βήμα κατά την εκτέλεση του κώδικα της εφαρμογής είναι η εισαγωγή μιας πληθώρας βιβλιοθηκών. Πολλές από αυτές εισάγονται αυτόματα από το Android Studio και είναι απαραίτητες για βασικές λειτουργίες κάθε εφαρμογής. Από τις υπόλοιπες βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν, για το κομμάτι χειρισμού των αδειών που χρειάζεται η εφαρμογή ήταν απαραίτητες οι `androidx.core` και η `android.content`. Χρησιμοποιήθηκε η κλάση `ActivityCompat` από τη βιβλιοθήκη `androidx.core`, και οι `ContextCompat` και `PackageManager` από τη βιβλιοθήκη `android.content`. Η πρώτη από τις κλάσεις προσφέρει μεθόδους που είναι χρήσιμες για τα αιτήματα παραχώρησης αδειών που εμφανίζονται στον χρήστη. Η δεύτερη περιλαμβάνει μεθόδους για τον έλεγχο αν μια άδεια έχει δοθεί στην εφαρμογή ή όχι. Η τρίτη από τις κλάσεις προσφέρει κάποιες σταθερές όπως είναι, μεταξύ άλλων, η `PackageManager.PERMISSION_GRANTED` καθώς και η `PackageManager.PERMISSION_DENIED`, οι οποίες διευκολύνουν τη διαδικασία ελέγχου για το αν κάποια άδεια έχει δοθεί ή όχι.

Για την εμφάνιση μηνυμάτων στον χρήστη της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες `android.view` και `android.widget`. Η πρώτη χρησιμοποιείται πέρα από τα εμφανιζόμενα μηνύματα και για τα υπόλοιπα στοιχεία του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής. Περιέχει την κλάση `View`, η οποία αποτελεί το θεμέλιο για κάθε μέρος του γραφικού περιβάλλοντος. Μέσω αυτής μπορούν να ρυθμίζονται για κάποιο γραφικό στοιχείο διάφορες ιδιότητές του, η ορατότητά του, ενώ μπορεί να κατασκευαστεί και μια διεπαφή που να παρακολουθεί (`listener`) την αλληλεπίδραση του χρήστη με το συγκεκριμένο στοιχείο και να απάντα σε αυτήν (όταν για παράδειγμα ο χρήστης πατάει πάνω στο γραφικό στοιχείο). Η βιβλιοθήκη `widget` περιέχει την κλάση `TextView` η οποία προσφέρει αντίστοιχες λειτουργίες αλλά αφορά ειδικά στοιχεία κειμένου. Είναι απαραίτητη για την εμφάνιση κειμένου και παρέχει τη δυνατότητα ενημέρωσης κάποιου στοιχείου κειμένου σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας την κλάση `View` μπορεί κανείς να επιλέξει ένα γραφικό στοιχείο κειμένου μέσω της μεθόδου `findViewById()`, και στη συνέχεια να ορίσει το κείμενο του στοιχείου αυτού μέσω της μεθόδου `setText()` της κλάσης `TextView`.

Οι βιβλιοθήκες `android.view` και `android.widget` ήταν επίσης απαραίτητες για το μπουτόν από όπου μπορεί ο χρήστης να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί τη λειτουργία καταγραφής δεδομένων σε αρχεία κειμένου (`START LOGGING / STOP LOGGING`). Οι κλάσεις που ήταν απαραίτητες σε αυτήν τη περίπτωση ήταν οι `ToggleButton` και `OnClickListener`. Η κλάση `ToggleButton` χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός μπουτόν, ενώ διαθέτει και μια σημαντική μέθοδο, την `setOnClickListener()` μέσω της οποίας παρακολουθείται η κατάσταση του μπουτόν και μόλις αυτή αλλάξει μπορούν να εκτελεστούν συγκεκριμένες ενέργειες. Ο ορισμός των ενεργειών αυτών γίνεται μέσω της κλάσης `OnClickListener`.

Για το γράφημα που περιλαμβάνει η εφαρμογή και όπου εμφανίζονται οι τελευταίες τιμές του RSSI χρησιμοποιήθηκαν οι κλάσεις `GraphView`, `GridLabelRenderer`, `DataPoint` και `LineGraphSeries` της βιβλιοθήκης `com.jjoe64.graphview` [107]. Η `GraphView` είναι η βασική

κλάση της βιβλιοθήκης. Προσφέρει τον “καμβά” του γραφήματος όπου αργότερα θα προστεθούν τα σημεία δεδομένων. Επιτρέπει επίσης την προσαρμογή διαφόρων ρυθμίσεων για το γράφημα. Η κλάση `GridLabelRenderer` μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ρυθμίσεις σχετικά με το κείμενο και τις τιμές που εμφανίζονται στους άξονες του γραφήματος, καθώς και για ρυθμίσεις που αφορούν τις γραμμές πλέγματος που μπορεί αυτό να περιλαμβάνει. Η κλάση `DataPoint` είναι απαραίτητη για την εισαγωγή σημείων στο γράφημα. Τέλος, η κλάση `LineGraphSeries` μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μιας γραμμής στο γράφημα μέσω της ένωσης των σημείων που έχουν οριστεί με τη βοήθεια της κλάσης `DataPoint`. Παρέχει επίσης τη δυνατότητα μορφοποίησης της γραμμής αυτής.

Καθώς η εφαρμογή καταγράφει δεδομένα σε αρχεία κειμένου στην εσωτερική μνήμη της συσκευής Android, ήταν απαραίτητη η βιβλιοθήκη `java.io`. Από αυτήν χρησιμοποιήθηκαν οι κλάσεις `File`, `FileWriter`, `IOException` και `PrintWriter`. Η κλάση `File` περιλαμβάνει μεθόδους για την κατασκευή φακέλων και αρχείων. Η κλάση `FileWriter` είναι απαραίτητη για την εγγραφή χαρακτήρων σε ένα αρχείο, ενώ η κλάση `IOException` διευκολύνει την αντιμετώπιση τυχόν σφαλμάτων. Τέλος, η κλάση `PrintWriter` διαθέτει μεθόδους για τη μορφοποίηση του περιεχομένου που τελικά αποθηκεύεται σε ένα αρχείο.

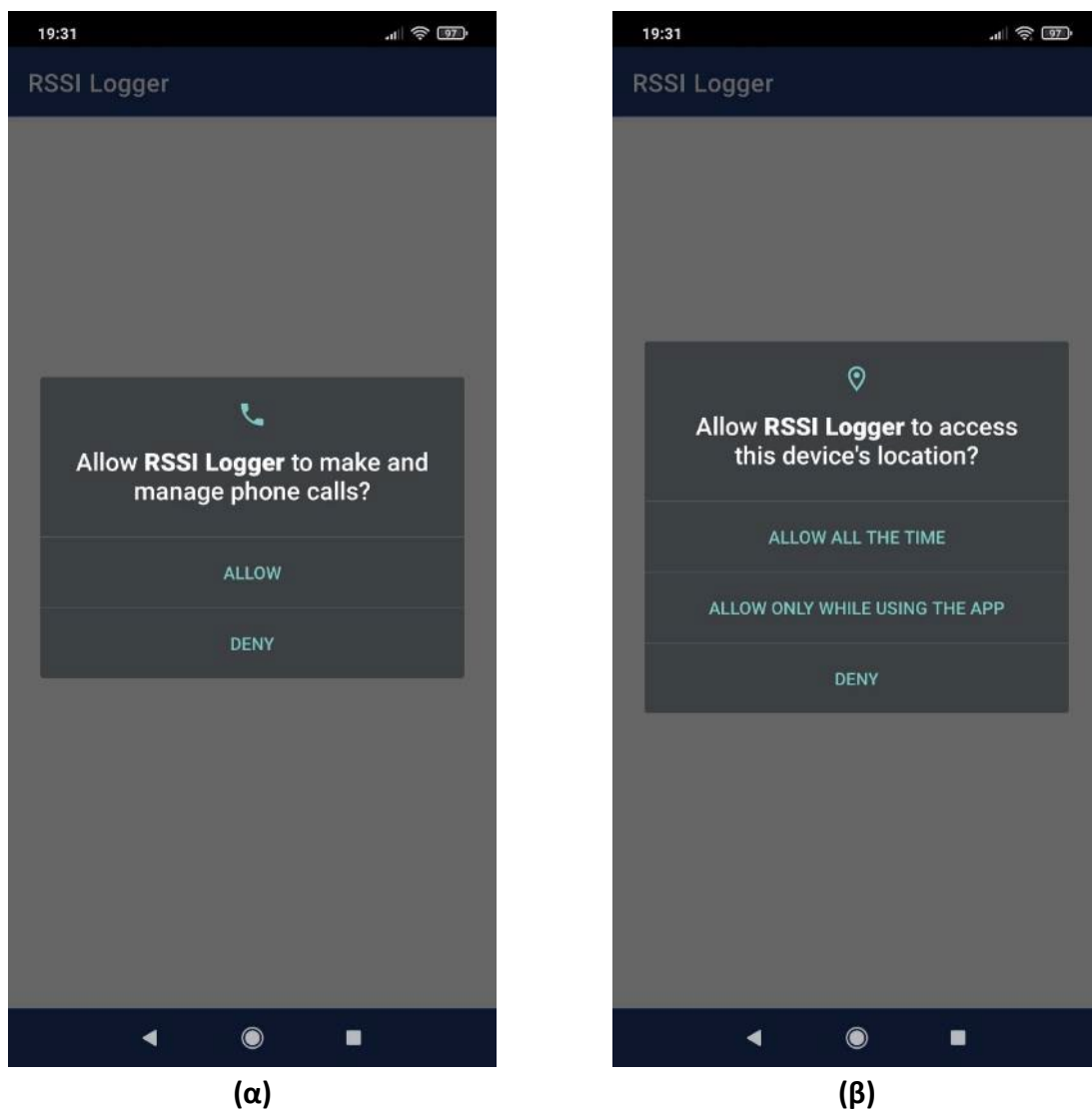
Για την ανάκτηση των βασικών πληροφοριών που καταγράφονται από την εφαρμογή και εμφανίζονται στο γραφικό της περιβάλλον, δηλαδή για το RSSI, τον τύπο δικτύου, τον αριθμό ARFCN και τους κωδικούς MCC, MNC, LAC και Cell ID, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη `android.telephony`. Πιο συγκεκριμένα, από τη βιβλιοθήκη αυτή χρησιμοποιήθηκε η κλάση `TelephonyManager`. Η κλάση αυτή περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους μέσω των οποίων μπορούν να προσδιοριστούν όλες οι ζητούμενες τιμές.

Η λειτουργία καταγραφής δεδομένων από την εφαρμογή υλοποιήθηκε ως υπηρεσία. Οι απαραίτητες βιβλιοθήκες για τον σκοπό αυτόν ήταν οι `android.app`, `android.content`, `android.os` και `android.core.app`. Από τη βιβλιοθήκη `android.app` χρησιμοποιήθηκε η κλάση `Service`. Μια λειτουργία που ορίζεται ως κλάση `Service` μπορεί να τρέχει στο παρασκήνιο για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. Απαραίτητη κλάση της βιβλιοθήκης `android.content` ήταν η `Intent`. Η κλάση αυτή χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενεργειών των οποίων η εκτέλεση είναι επιθυμητή με την έναρξη μιας υπηρεσίας. Από τη βιβλιοθήκη `android.os` χρησιμοποιήθηκε η κλάση `IBinder`. Αυτή προσφέρει μεθόδους που διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τμημάτων μιας εφαρμογής, όπως για παράδειγμα μεταξύ της κύριας δραστηριότητας της εφαρμογής και μιας υπηρεσίας ή ακόμα και μεταξύ δραστηριοτήτων διαφορετικών εφαρμογών. Η επικοινωνία αυτή αναφέρεται ως επικοινωνία μεταξύ διεργασιών ή IPC (Inter-Process Communication). Για την εμφάνιση ειδοποιήσεων στη γραμμή κατάστασης της συσκευής Android χρησιμοποιήθηκε από τη βιβλιοθήκη `android.app` η κλάση `NotificationManager`, ενώ χρησιμοποιήθηκε και η κλάση `PendingIntent` της ίδιας βιβλιοθήκης η οποία επιτρέπει στην εφαρμογή την εκτέλεση ενεργειών στο μέλλον, χωρίς απαραίτητα αυτή να τρέχει. Στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής η μελλοντική αυτή ενέργεια είναι η εκκίνηση της εφαρμογής στο σενάριο όπου, ενώ η εφαρμογή είναι κλειστή,

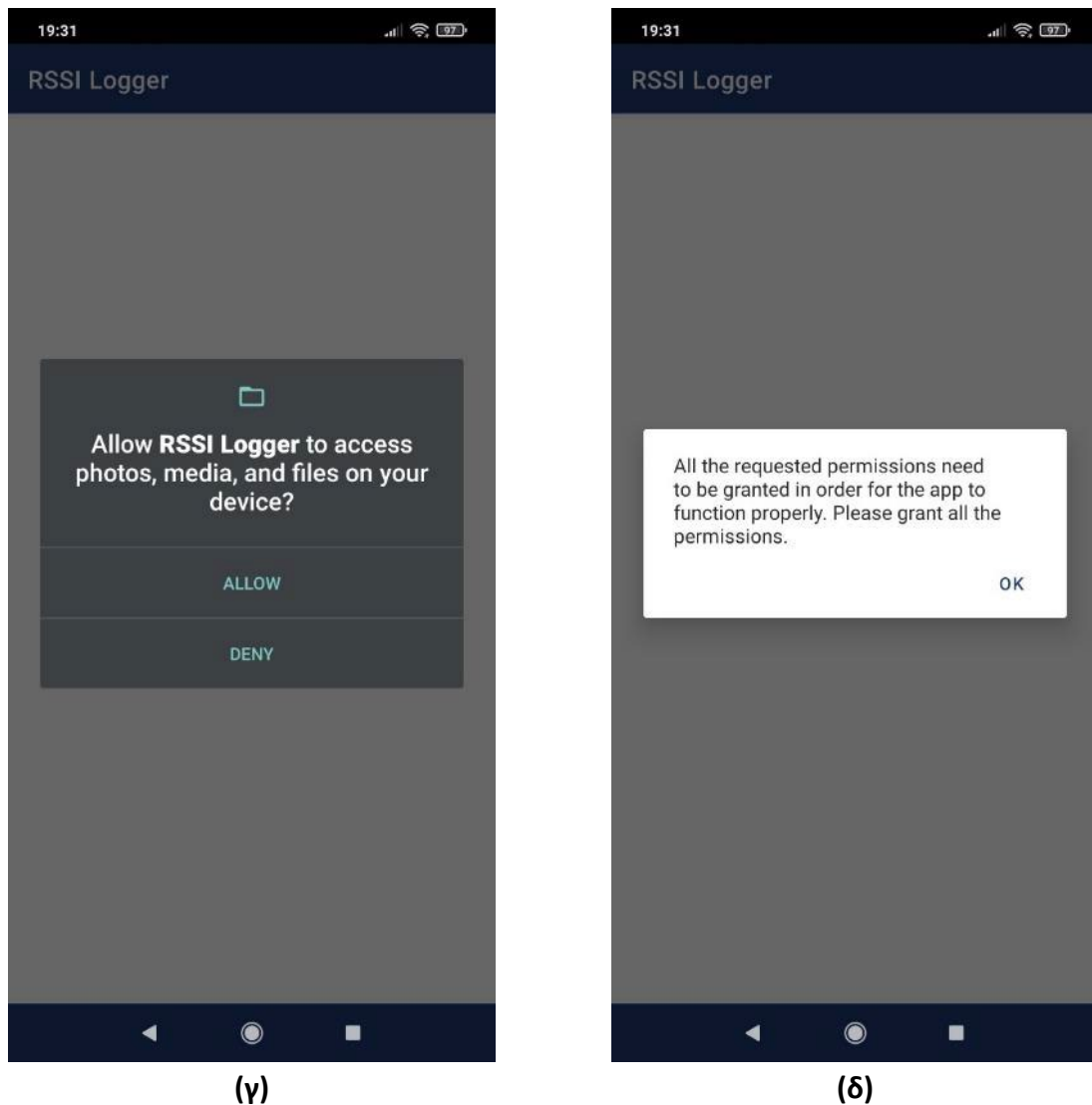
η υπηρεσία καταγραφής δεδομένων είναι ενεργή και ο χρήστης πατάει πάνω στη σχετική ειδοποίηση. Τέλος, από τη βιβλιοθήκη `android.core.app` ήταν απαραίτητη η κλάση `NotificationCompat`. Η κλάση αυτή διαθέτει μεθόδους μέσω των οποίων μπορεί κανείς να κατασκευάσει μια ειδοποίηση με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Ο απαραίτητες άδειες

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.6, αφού φορτωθούν οι βιβλιοθήκες, η εφαρμογή ζητάει από τον χρήστη τις απαραίτητες για τη λειτουργία της άδειες, αν αυτές δεν έχουν παραχωρηθεί ήδη. Τα σχετικά με τις άδειες μηνύματα που εμφανίζονται στον χρήστη φαίνονται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Τα μηνύματα που εμφανίζονται στην εφαρμογή όταν δεν έχουν παραχωρηθεί άδειες πρόσβασης **(α)** στην κατάσταση, **(β)** την τοποθεσία, **(γ)** τον αποθηκευτικό χώρο της συσκευής Android, καθώς και **(δ)** το επακόλουθο μήνυμα που εμφανίζεται όταν ο χρήστης αρνηθεί τουλάχιστον μια από τις άδειες.



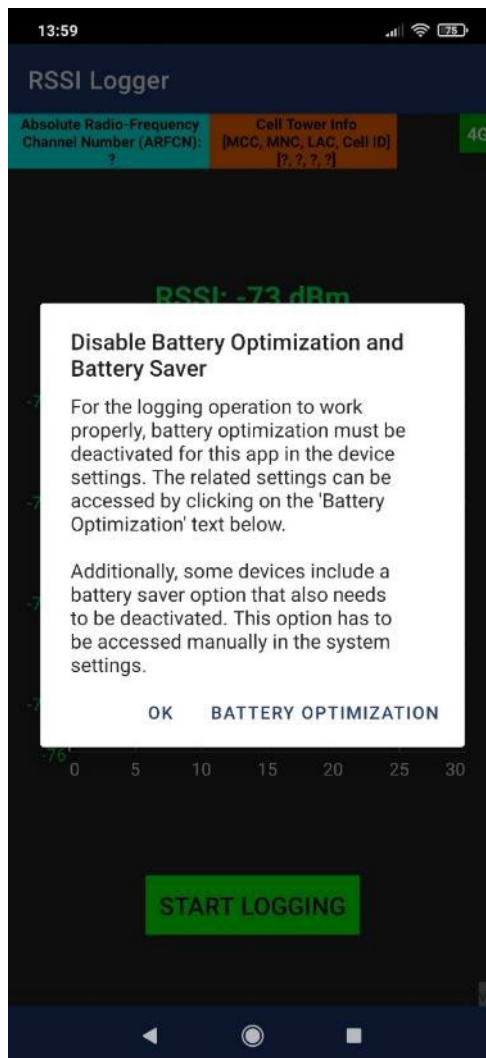
Σχήμα 2.7 (Συνέχεια).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, η εφαρμογή ζητάει από τον χρήστη άδειες που αφορούν την πρόσβαση στην κατάσταση της κινητής συσκευής, στην τοποθεσία αυτής, καθώς και στον αποθηκευτικό της χώρο. Στην περίπτωση που ο χρήστης αρνηθεί τουλάχιστον μια από τις ζητούμενες άδειες, τότε εμφανίζεται ένα μήνυμα (Σχήμα 2.7δ) το οποίο τον ενημερώνει πως είναι αναγκαία η παραχώρηση όλων των ζητούμενων αδειών για την ορθή λειτουργία της εφαρμογής. Έπειτα, η εφαρμογή ζητάει ξανά όσες άδειες δεν παραχωρήθηκαν ακόμα. Ο λόγος που ζητάει την παραχώρηση άδειας για την πρόσβαση στην κατάσταση της κινητής συσκευής είναι για να μπορεί να έχει πρόσβαση στην τιμή του RSSI, καθώς και στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας όπου είναι συνδεδεμένη η συσκευή. Με την παραχώρηση της άδειας πρόσβασης στην τοποθεσία της συσκευής, επιτρέπεται στην εφαρμογή η ανάκτηση των τιμών ARFCN, MCC, MNC, LAC και Cell ID. Ο λόγος που πρέπει να παραχωρηθεί η συγκεκριμένη άδεια είναι γιατί μέσω των τιμών αυτών μπορεί κανείς να προσδιορίσει την

τοποθεσία της συσκευής. Επιπλέον, για την αποτελεσματική καταγραφή των δεδομένων θα πρέπει να επιτρέπεται στην εφαρμογή να έχει πρόσβαση στην τοποθεσία ανά πάσα στιγμή (“ALLOW ALL THE TIME”). Αν επιτραπεί η πρόσβαση μόνο κατά τη διάρκεια χρήσης της εφαρμογής τότε δε θα μπορεί να καταγράψει τις τιμές ARFCN, MCC, MNC, LAC και Cell ID για μεγάλα χρονικά διαστήματα, καθώς μόλις σβήσει η οθόνη της συσκευής Android τότε η εφαρμογή χάνει την πρόσβαση στην τοποθεσία και άρα στις τιμές αυτές. Τέλος, η άδεια πρόσβασης στον αποθηκευτικό χώρο της συσκευής Android είναι αναγκαία για τη δημιουργία του αρχείου όπου καταγράφονται τα δεδομένα, καθώς και του σχετικού φακέλου κατά την πρώτη χρήση.

Ρυθμίσεις που πρέπει να απενεργοποιηθούν για την αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα

Αφού παραχωρηθούν όλες οι απαραίτητες άδειες στην εφαρμογή, ακολουθεί, σύμφωνα και με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.6, η φόρτωση του γραφικού περιβάλλοντος αυτής. Πριν όμως η εφαρμογή προχωρήσει στις βασικές της λειτουργίες ελέγχει αν είναι ενεργοποιημένη για αυτήν η λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας (battery optimization) από τις ρυθμίσεις της συσκευής. Αν είναι ενεργοποιημένη τότε εμφανίζει ένα μήνυμα ειδοποίησης στον χρήστη. Η λειτουργία αυτή είναι ενεργοποιημένη από προεπιλογή για κάθε εφαρμογή και η εισαγωγή της έγινε για πρώτη φορά στο Android 6. Η απενεργοποίηση της είναι σημαντική για την αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. Όταν αυτή η λειτουργία είναι ενεργοποιημένη για την εφαρμογή, τότε, έπειτα από ένα διάστημα μερικών λεπτών αφού σβήσει η οθόνη της συσκευής, η εφαρμογή τερματίζεται από το σύστημα Android. Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να έχει και μια δεύτερη λειτουργία η οποία, αν και δεν περιλαμβάνεται σε όλες τις συσκευές Android, συναντάται σε πολλές από αυτές. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται εξοικονόμηση μπαταρίας (battery saver). Δεν υπάρχει τρόπος για την εφαρμογή να γνωρίζει αν η συγκεκριμένη λειτουργία περιλαμβάνεται στην εκάστοτε συσκευή Android και αν είναι ενεργοποιημένη για αυτήν. Μπορεί μόνο να ανιχνεύσει τη λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας. Κάθε φορά που ο χρήστης ανοίγει την εφαρμογή, αν η λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας είναι ενεργοποιημένη εμφανίζεται το προειδοποιητικό μήνυμα. Στο μήνυμα αυτό περιλαμβάνεται μια επιλογή την οποία αν επιλέξει ο χρήστης οδηγείται στο κατάλληλο σημείο των ρυθμίσεων από όπου μπορεί να απενεργοποιήσει αυτήν τη λειτουργία. Το μήνυμα ενημερώνει παράλληλα τον χρήστη για την πιθανότητα η συσκευή του να περιλαμβάνει και τη λειτουργία εξοικονόμησης μπαταρίας, και πως στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να προβεί χειροκίνητα στο σχετικό σημείο των ρυθμίσεων και να απενεργοποιήσει τη συγκεκριμένη λειτουργία. Αν η λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας απενεργοποιηθεί, τότε αυτό το μήνυμα παύει να εμφανίζεται κατά την εκκίνηση της εφαρμογής. Στο σχήμα 2.8 απεικονίζεται το μήνυμα προειδοποίησης του χρήστη για τη λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας, καθώς και για τη λειτουργία εξοικονόμησης μπαταρίας.



Σχήμα 2.8: Προειδοποιητικό μήνυμα που εμφανίζει η εφαρμογή στον χρήστη όταν είναι ενεργοποιημένη για αυτή η λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας.

Οι κύριες λειτουργίες

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχήματος, 2.6, έπειτα από τον έλεγχο για το αν είναι ενεργοποιημένη ή όχι η λειτουργία βελτιστοποίησης της μπαταρίας, η εφαρμογή προχωρά στις κύριες λειτουργίες της. Αρχικά γίνεται αρχικοποίηση του γραφήματος όπου αργότερα θα προστεθούν οι τιμές του RSSI, καθώς και του μπουτόν που χρησιμοποιείται για την έναρξη ή τον τερματισμό της λειτουργίας καταγραφής δεδομένων. Για τον ορισμό των διαστάσεων του γραφήματος η εφαρμογή υπολογίζει τη διαγώνιο της οθόνης της συσκευής σε pixel (μέσω Πυθαγορείου Θεωρήματος από το πλάτος και το ύψος), και έπειτα σε ίντσες αφού ανακτήσει την πληροφορία της πυκνότητας των pixel της οθόνης εκφρασμένη σε DPI (dots per inch). Ορίζονται δύο κατηγορίες, η διαγώνιος να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη των 5.2 pixel. Στην πρώτη περίπτωση η αναλογία διαστάσεων του γραφήματος ορίζεται 6:5 ενώ στη δεύτερη

περίπτωση ορίζεται 1:1. Οι λειτουργίες που περιγράφονται στη συνέχεια επαναλαμβάνονται συνεχώς.

Στο επόμενο στάδιο, η εφαρμογή ανακτά την πληροφορία του είδους του δικτύου κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιείται από τη συσκευή Android και το εμφανίζει στο αντίστοιχο πεδίο του γραφικού περιβάλλοντος. Τα υποστηριζόμενα από την εφαρμογή δίκτυα είναι δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς (2G, 3G και 4G). Αν το δίκτυο δεν είναι ένα από αυτά ή αν δεν υπάρχει συνδεσιμότητα, τότε η εφαρμογή ελέγχει τον τύπο δικτύου κάθε δευτερόλεπτο μέχρι να βρεθεί κάποιο από τα προαναφερθέντα δίκτυα.

Αφού το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας είναι ένα από τα υποστηριζόμενα της εφαρμογής, τότε αυτή προχωράει στην ανάκτηση της τιμής του RSSI, του αριθμού ARFCN, καθώς και των κωδικών MCC, MNC, LAC και Cell ID. Αμέσως μετά αναβαθμίζονται τα αντίστοιχα πεδία του γραφικού περιβάλλοντος. Για τις τιμές αυτές, με μοναδική εξαίρεση την τιμή του RSSI, πρέπει η λειτουργία τοποθεσίας της συσκευής να είναι ενεργοποιημένη. Χωρίς αυτήν το σύστημα Android δεν επιτρέπει στην εφαρμογή την πρόσβαση σε αυτές, και στα σχετικά πεδία εμφανίζεται στη θέση της κάθε τιμής το σύμβολο "?". Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στο υπόβαθρο του Σχήματος 2.8.

Στο επόμενο βήμα, ελέγχεται αν ο χρήστης έχει ενεργοποιήσει τη λειτουργία καταγραφής δεδομένων, αν δηλαδή έχει πατήσει στο μπουτόν "START LOGGING". Αν ναι, τότε εμφανίζεται μια σχετική ένδειξη ("Logging...") και αμέσως μετά ελέγχεται αν έχουν παρέλθει 10 δευτερόλεπτα από την τελευταία φορά που έγινε καταγραφή των δεδομένων. Αν η συνθήκη αυτή είναι αληθής, τότε στο αρχείο κειμένου όπου γίνεται η καταγραφή προστίθενται οι τιμές RSSI, ARFCN, MCC, MNC, LAC, Cell ID, καθώς και η ώρα της καταγραφής. Αν το αρχείο κειμένου δεν υπήρχε ήδη τότε κατασκευάζεται και το όνομά του είναι η εκάστοτε ημερομηνία. Όταν η ημερομηνία αλλάζει κατασκευάζεται και ένα νέο αρχείο. Αν δεν έχουν περάσει 10 δευτερόλεπτα από την τελευταία καταγραφή δεδομένων ή και απευθείας μετά από κάποια καταγραφή, το επόμενο βήμα είναι η ενημέρωση του γραφήματος ώστε αυτό να απεικονίζει έως και τις 30 τελευταίες τιμές του RSSI. Ακολουθεί η αναμονή ενός δευτερολέπτου και η λειτουργία της εφαρμογής επιστρέφει στο σημείο όπου ανακτάται η πληροφορία σχετικά με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας το οποίο χρησιμοποιείται από την κινητή συσκευή. Η λειτουργία από το σημείο αυτό και μετέπειτα επαναλαμβάνεται κάθε δευτερόλεπτο μέχρι τον τερματισμό της εφαρμογής.

Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι αν ο χρήστης ενεργοποιήσει τη λειτουργία καταγραφής δεδομένων και έπειτα τερματίσει την εφαρμογή, τότε η καταγραφή δεδομένων θα συνεχιστεί κανονικά. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η λειτουργία αυτή έχει οριστεί ως υπηρεσία. Η εφαρμογή ελέγχει αν το λειτουργικό σύστημα είναι κατώτερο του ή τουλάχιστον Android 8. Αν είναι κατώτερο του Android 8 τότε η λειτουργία καταγραφής τρέχει ως υπηρεσία παρασκήνιου (background service). Ωστόσο, με την κυκλοφορία του Android 8 εισήχθησαν και κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά τις υπηρεσίες εφαρμογών που τρέχουν στο παρασκήνιο για μεγάλα χρονικά διαστήματα [108]. Ξεκινώντας από αυτήν την

έκδοση του συστήματος Android, δεν επιτρέπεται πια στις εφαρμογές να εκτελούν λειτουργίες τους ως υπηρεσία παρασκηνίου. Οι εφαρμογές που διαθέτουν υπηρεσίες προοριζόμενες να τρέχουν συνεχώς θα πρέπει να ενημερώνουν τον χρήστη μέσω σχετικών ειδοποιήσεων καθ' όλη τη διάρκεια που η υπηρεσία είναι ενεργή. Για τον σκοπό αυτόν, στο Android 8 έγινε η εισαγωγή μιας νέας μεθόδου που αφορά τη δημιουργία υπηρεσιών προσκηνίου (foreground service) η οποία ικανοποιεί την προαναφερθείσα συνθήκη. Έτσι, η παρούσα εφαρμογή κατασκευάζει μια παραδοσιακή υπηρεσία παρασκηνίου αν η έκδοση Android είναι κατώτερη του Android 8, ενώ κατασκευάζει μια υπηρεσία προσκηνίου, με την εμφάνιση της σχετικής ειδοποίησης, αν η συσκευή τρέχει Android 8 ή πιο πρόσφατη έκδοση.

Υλοποίηση Εξειδικευμένης Πειραματικής Διάταξης

3.1 Εισαγωγή

Για τους σκοπούς της διατριβής, επιπρόσθετα της εφαρμογής Android που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε και μια εξειδικευμένη πειραματική διάταξη αποτελούμενη από το σύστημα ενός πομπού, καθώς και εκείνο ενός δέκτη. Σκοπός αυτής της διάταξης ήταν η διεξαγωγή περαιτέρω μετρήσεων για τη διερεύνηση επιπλέον συχνοτήτων, πέραν αυτής των 2630 MHz που μελετήθηκε μέσω της εφαρμογής που εγκαταστάθηκε σε μια συσκευή Android. Η υλοποίηση μιας τέτοιας διάταξης ήταν σημαντική και για τη διεξαγωγή μετρήσεων ισχύος σήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτήν του 1 dB που προσέφερε η κινητή συσκευή που χρησιμοποιήθηκε. Με την υλοποίηση της πειραματικής διάταξης μπόρεσαν να μελετηθούν RF σήματα τριών ακόμα συχνοτήτων της μικροκομματικής περιοχής, συγκεκριμένα των συχνοτήτων 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Τόσο στο σύστημα του πομπού όσο και σε εκείνο του δέκτη κεντρικό ρόλο διαδραμάτιζε ένας μικροϋπολογιστής Raspberry Pi 4.

3.2 Ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi

3.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Το Raspberry Pi είναι ένας μικροϋπολογιστής που έχει το μέγεθος μιας πιστωτικής κάρτας, και σχεδιάστηκε για να κάνει την πληροφορική πιο προσιτή και συναρπαστική, ιδιαίτερα για τους νέους. Δημιουργήθηκε από τον Eben Upton, ο οποίος παρατήρησε μια μείωση του ενδιαφέροντος και του ταλέντου μεταξύ των ανερχόμενων μηχανικών υπολογιστών στα μέσα της δεκαετίας του 2000. Το Raspberry Pi είχε ως στόχο να αναδημιουργήσει τον ενθουσιασμό για την πληροφορική που υπήρχε τη δεκαετία του 1980, παρέχοντας μια προσιτή και ευέλικτη πλατφόρμα για τη μάθηση και τον πειραματισμό.

Αρχικά σχεδιασμένο με ταπεινούς στόχους ως προς την ποσότητα παραγωγής, το Raspberry Pi ξεκίνησε ως ένα πρωτότυπο όπου όλες οι κολλήσεις γίνονταν με το χέρι, θυμίζοντας τους πρώιμους αυτοσχέδιους υπολογιστές, και ονομάστηκε ABC Micro, προς τιμήν των υπολογιστών BBC Micro που κυκλοφορούσαν τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, μετέπειτα εξελίχθηκε σε μια πιο σύγχρονη συσκευή με τη βοήθεια υλικού χαμηλού κόστους, όπως το τσιπ Broadcom 2835 που διαθέτει τον επεξεργαστή ARM 11.

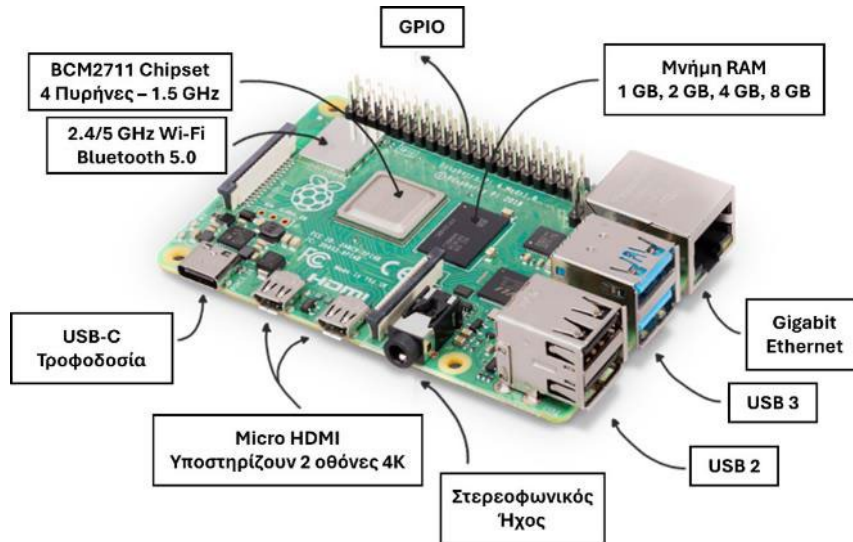
Το Raspberry Pi Foundation, ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που ιδρύθηκε το 2009, επιβλέπει την ανάπτυξη και την προώθηση του Raspberry Pi. Παρά το ταπεινό της ξεκίνημα, η συσκευή απέκτησε γρήγορα δημοτικότητα, ξεπουλώντας την αρχική της παραγωγή μέσα σε λίγες ώρες. Η επιτυχία αυτή οδήγησε σε νέες συνεργασίες με εταιρίες διανομής ηλεκτρονικών εξαρτημάτων για μαζική παραγωγή, η οποία τελικά μεταφέρθηκε στη Νότια Ουαλία, από την Κίνα όπου είχε ξεκινήσει αρχικά.

Μολονότι το Raspberry Pi εξυπηρετεί διάφορους σκοπούς, από πρότζεκτ χομπιστών μέχρι εμπορικές εφαρμογές, ο πρωταρχικός του στόχος παραμένει να εμπνεύσει το ενδιαφέρον για την τεχνολογία και τον προγραμματισμό, ιδιαίτερα στους νέους ενδιαφερόμενους. Η προσιτή του τιμή, το μικρό μέγεθος και η ευελιξία του το καθιστούν ιδανικό εργαλείο για την εξερεύνηση εννοιών της πληροφορικής, τον προγραμματισμό και τη δημιουργία καινοτόμων πρότζεκτ [109].

Σήμερα κυκλοφορούν τρεις βασικές σειρές Raspberry Pi, με την κάθε μια να περιλαμβάνει πλέον αρκετά μοντέλα. Η βασική σειρά ονομάζεται απλώς Raspberry Pi, ενώ οι άλλες δύο σειρές έχουν λιγότερες εισόδους και εξόδους, αλλά και μικρότερο μέγεθος και χαμηλότερο κόστος, και ονομάζονται Raspberry Pi Zero και Raspberry Pi Pico. Οι τελευταίες αποτελούν φθηνές εναλλακτικές για πρότζεκτ όπου δεν είναι απαραίτητες όλες οι λειτουργίες που προσφέρει η βασική σειρά Raspberry Pi ή για πρότζεκτ όπου υπάρχει ανάγκη για κάποιο Raspberry Pi μικρότερου μεγέθους [110].

3.2.2 Το μοντέλο Raspberry Pi 4 Model B

Στα πλαίσια της διατριβής χρησιμοποιήθηκε ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi 4 Model B, τόσο για το σύστημα του πομπού όσο και για εκείνο του δέκτη. Το Raspberry Pi 4 Model B κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 2019. Περιλαμβάνει το chipset Broadcom BCM2711 με τον τετραπύρηνο 64-bit επεξεργαστή (CPU) ARM Cortex-A72, το ρολόι του οποίου λειτουργεί σε συχνότητα 1.5 GHz. Σαν ολοκληρωμένος υπολογιστής, περιλαμβάνει επιπλέον διαφόρων ειδών υποδοχές εισόδου και εξόδου για τη σύνδεση πληθώρας εξωτερικών συσκευών, όπως οθόνες, πληκτρολόγια, ποντίκια, ηχεία κλπ. Προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο μέσω είτε Ethernet είτε Wi-Fi, ενώ παράλληλα μπορεί να συνδεθεί και με ασύρματες συσκευές μέσω Bluetooth. Το συγκεκριμένο μοντέλο κυκλοφορεί με ενσωματωμένη μνήμη 1, 2, 4 ή 8 GB LPDDR4-3200 SDRAM. Υποστηρίζει πολλά λειτουργικά συστήματα που μπορούν να εγκατασταθούν σε μια κάρτα μνήμης microSD για την οποία υπάρχει υποδοχή στο κάτω μέρος του μικροϋπολογιστή. Εκεί αποθηκεύονται όλα τα αρχεία καθώς και το λειτουργικό σύστημα στην ολότητά του. Η τροφοδοσία γίνεται μέσω ενός βύσματος USB-C με τάση 5V και ρεύμα τουλάχιστον 3A, ενώ εναλλακτικά μπορεί να γίνει και μέσω των κατάλληλων ακίδων της ακιδοσειράς που διαθέτει. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το Raspberry Pi 4 Model B, και στη συνέχεια, στον Πίνακα 3.1 ακολουθεί μια περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του μικροϋπολογιστή [111].



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 4 Model B.

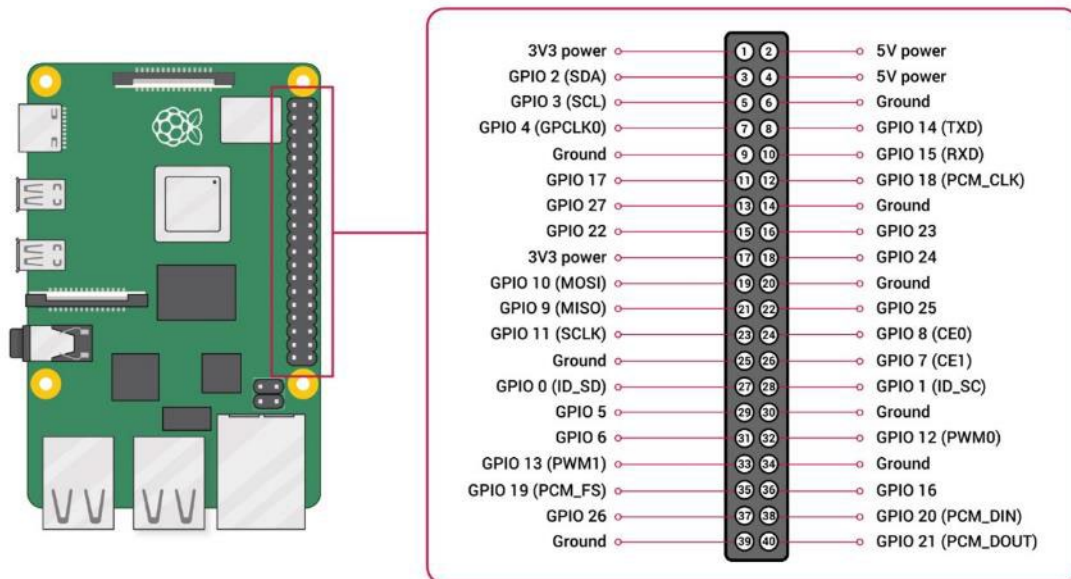
Πίνακας 3.1: Βασικά χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 4 Model B.

Επεξεργαστής	Broadcom BCM2711 με 4 πυρήνες 64-bit Cortex-A72 αρχιτεκτονικής ARM v8 και 1.5 GHz συχνότητα ρολογιού
Μνήμη SDRAM	1, 2, 4 ή 8 GB LPDDR4
Συνδεσιμότητα	2.4/5 GHz Wi-Fi Bluetooth 5.0 Low Energy (BLE) Gigabit Ethernet 2 x θύρες USB 3.0 2 x θύρες USB 2.0
GPIO	40 GPIO σε μια ακιδοσειρά 28 από τα GPIO μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για επικοινωνία μέσω των εξής διεπαφών: έως 6 x UART, έως 6 x I2C, έως 5 x SPI, 1 x SDIO, 1 x DPI, 1 x PCM, έως 2 x κανάλια PWM, έως 3 x έξοδοι GPCLK
Εικόνα & Ήχος	2 x θύρες micro HDMI (υποστηρίζουν ανάλυση έως 4Kp60) Βύσμα σύνδεσης οθόνης MIPI DSI 2 γραμμών δεδομένων Βύσμα σύνδεσης κάμερας MIPI CPI 2 γραμμών δεδομένων Τετραπολικό βύσμα στερεοφωνικού ήχου και σύνθετου βίντεο
Τροφοδοσία	5 V DC μέσω υποδοχής USB-C (ελάχιστο ρεύμα 3 A) 5 V DC μέσω της ακιδοσειράς GPIO (ελάχιστο ρεύμα 3 A)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 και αναγράφεται στον Πίνακα 3.1, το Raspberry Pi 4 Model B περιλαμβάνει μια ακιδοσειρά με 40 συνολικά ακίδες εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης (GPIO,

Κεφάλαιο 3: Υλοποίηση Εξειδικευμένης Πειραματικής Διάταξης

General-Purpose Input/Output). Η πλειοψηφία αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία του Raspberry με άλλες συσκευές μέσω των διεπαφών UART, I2C, SPI, SDIO, DPI, PCM, PWM και GPCLK. Παράλληλα υπάρχουν και ακίδες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την τροφοδοσία περιφερειακών συσκευών με τάση είτε 5V είτε 3.3V. Η ακιδοσειρά περιλαμβάνει επιπλέον και διάφορες ακίδες γείωσης (ground). Από τις ακίδες GPIO, 28 είναι αριθμημένες. Αυτές μπορούν να προγραμματιστούν ως είσοδοι ή έξοδοι για διάφορες χρήσεις. Όταν μια ακίδα προγραμματίζεται ως έξοδος μπορεί να τεθεί σε κατάσταση είτε HIGH που αντιστοιχεί σε τάση εξόδου 3.3V είτε LOW που αντιστοιχεί σε τάση 0V. Αντίστοιχα, όταν μια ακίδα προγραμματίζεται ως είσοδος μπορεί να διαβαστεί ως HIGH (3.3V) ή LOW (0V). Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται ένα διάγραμμα όλων των ακίδων GPIO με την αρίθμηση τους, καθώς και των σημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε μια από τις ακίδες, για την επικοινωνία μέσω των διαφορετικών διεπαφών [112].



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα της ακιδοσειράς GPIO του Raspberry Pi 4 Model B, με τη λειτουργία της κάθε ακίδας και την αρίθμηση εκείνων που είναι προγραμματιζόμενες.

3.2.3 Το λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi OS

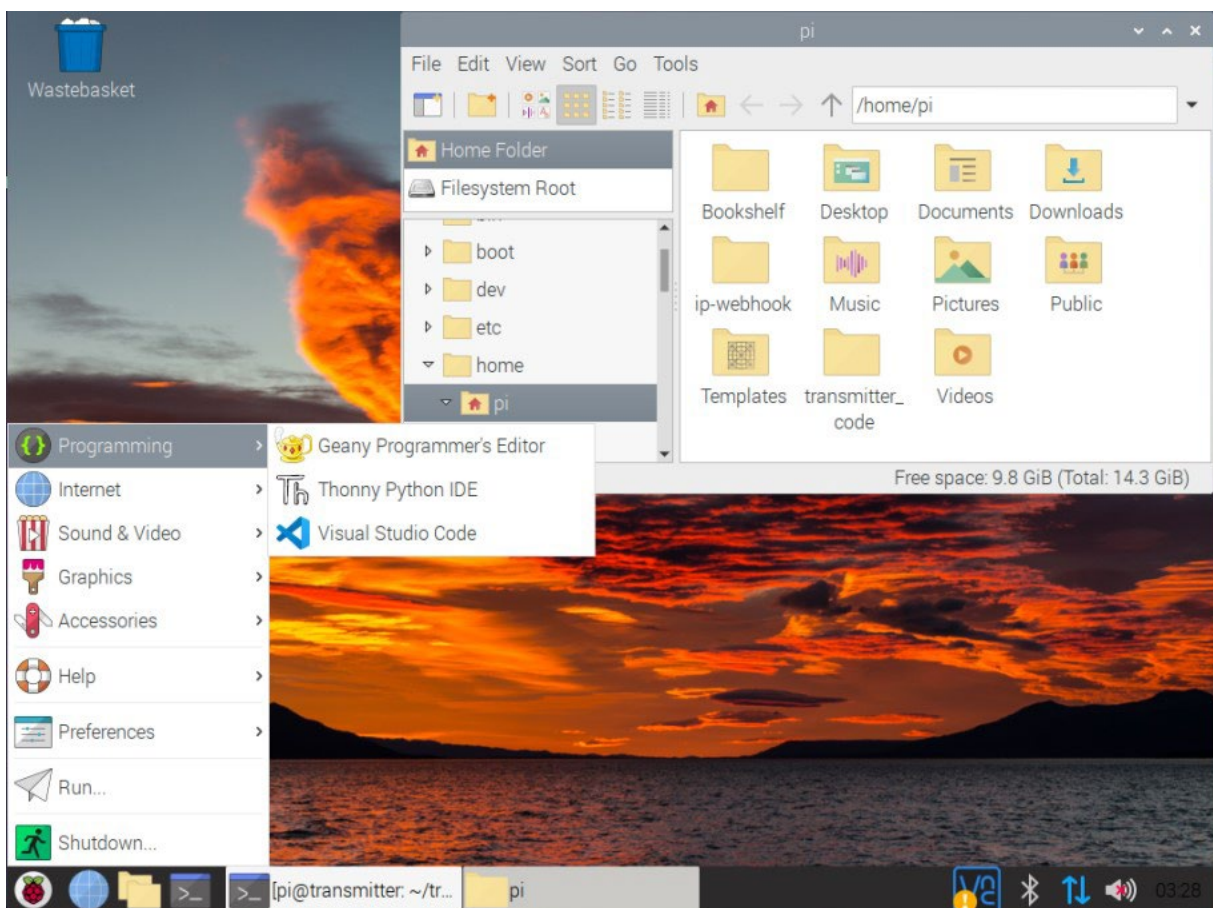
Οι μικροϋπολογιστές Raspberry Pi υποστηρίζουν γενικά πολλά λειτουργικά συστήματα, αλλά το επίσημο είναι το Raspberry Pi OS, που μέχρι πρότινος ονομάζονταν Raspbian, και είναι και εκείνο που εγκαταστάθηκε στα δύο Raspberry Pi που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν τη διατριβή. Το Raspberry Pi OS είναι ένα δωρεάν λειτουργικό σύστημα ανοιχτού κώδικα που δημιουργήθηκε από τον οργανισμό Raspberry Pi Foundation και είναι προσαρμοσμένο για να

προσφέρει ένα ευέλικτο και αποτελεσματικό περιβάλλον, προσαρμοσμένο στην αρχιτεκτονική ARM του Raspberry Pi.

Κεντρικό στοιχείο του Raspberry Pi OS είναι ο φιλικός προς τον χρήστη χαρακτήρας του, επεκτείνοντας την προσβασιμότητα τόσο σε αρχάριους όσο και σε έμπειρους προγραμματιστές. Το περιβάλλον της επιφάνειας εργασίας είναι μια τροποποιημένη μορφή του LXDE (Lightweight X11 Desktop Environment) και χρησιμοποιεί τον διαχειριστή παραθύρων Openbox, προσφέροντας εύκολη πλοήγηση μεταξύ αρχείων, εφαρμογών και ρυθμίσεων. Συνολικά, είναι βασισμένο στο Debian, μια δημοφιλή διανομή Linux.

Το λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi OS περιλαμβάνει μια σειρά προ-εγκατεστημένου λογισμικού, όπως το πρόγραμμα περιήγησης διαδικτύου Chromium, την πλήρη σουίτα γραφείου LibreOffice, τις γλώσσες προγραμματισμού Python και Scratch και διάφορα άλλα. Επίσης, προσφέρει τη δυνατότητα απομακρυσμένης σύνδεσης και ελέγχου του Raspberry Pi από έναν άλλον υπολογιστή, μέσω της τεχνολογίας VNC (Virtual Network Computing) [113,114].

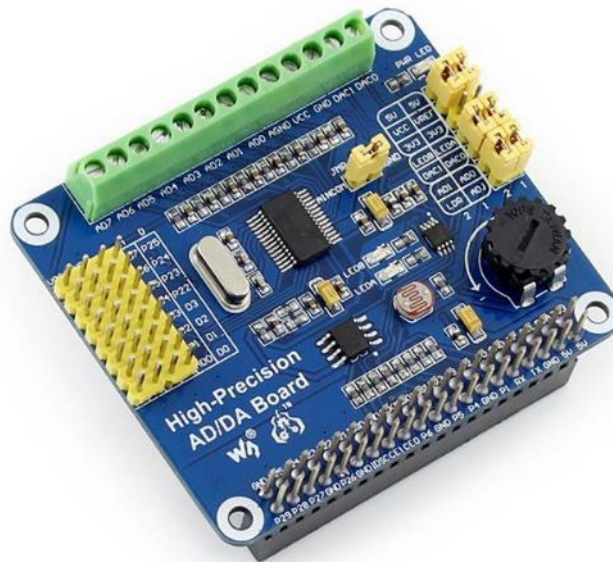
Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια απεικόνιση της επιφάνειας εργασίας του Raspberry Pi OS.



Σχήμα 3.3: Η επιφάνεια εργασίας του λειτουργικού συστήματος Raspberry Pi OS.

3.2.4 Η πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board του Raspberry Pi

Οι δυνατότητες που προσφέρει ο το Raspberry Pi μπορούν να επεκταθούν χρησιμοποιώντας πλακέτες επέκτασης, γνωστές και ως HAT (Hardware Attached on Top). Όπως υποδηλώνει και η ονομασία HAT, αυτές οι πλακέτες τοποθετούνται πάνω στο Raspberry Pi, και είναι ειδικά σχεδιασμένες ώστε να κουμπώνουν πάνω στην ακιδοσειρά GPIO. Παράλληλα, φροντίζουν να επεκτείνουν όλες τις ακίδες GPIO στην επάνω τους πλευρά, ώστε να μην εμποδίζεται η πρόσβαση σε αυτές. Υπάρχουν διαφόρων ειδών πλακέτες επέκτασης για το Raspberry Pi, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν από απλούς αισθητήρες έως πολύπλοκους ελεγκτές μοτέρ ή ενισχυτές ήχου. Για την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε σε αυτήν τη διατριβή χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board της Waveshare, που φαίνεται στο Σχήμα 3.4 [115].



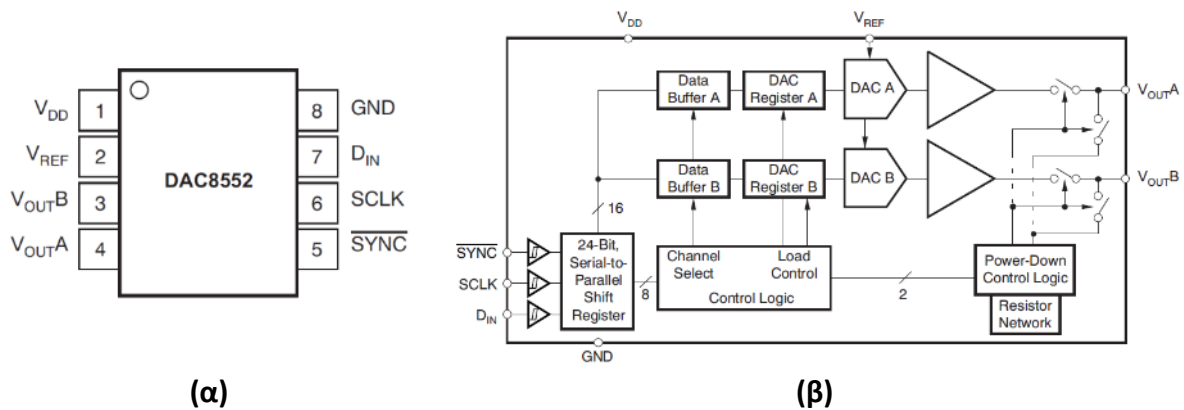
Σχήμα 3.4: Η πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board του Raspberry Pi.

Η πλακέτα επέκτασης High Precision AD/DA Board προσφέρει τη δυνατότητα στο Raspberry να χρησιμοποιήσει μέσω αυτής έναν 16-bit μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC) καθώς επίσης και έναν 24-bit μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC). Συγκεκριμένα, ο DAC που περιλαμβάνει είναι ο DAC8552, ενώ ο ADC είναι ο ADS1256. Πάνω στην πλακέτα επέκτασης υπάρχουν διάφορες ακίδες όπου μέσω βραχυκυκλωτήρων μπορεί να επιλεχθεί η τάση τροφοδοσίας καθώς και η τάση αναφοράς για τον DAC, με τις πιθανές τιμές να είναι 3.3 ή 5 V. Μέσω επιπλέον βραχυκυκλωτήρων μπορεί να δοκιμαστεί η λειτουργία του DAC και του ADC οδηγώντας τις εξόδους του DAC σε κάποια LED, καθώς και συνδέοντας σε δύο από τις εισόδους του ADC ένα ποτενσιόμετρο 10K ή μια φωτοαντίσταση που περιλαμβάνονται στην πλακέτα επέκτασης. Υπάρχουν διάφορα σημεία για την πρόσβαση στα κανάλια του DAC και του ADC, είτε με τη μορφή ακίδων είτε ως υποδοχές όπου μπορούν

να βιδωθούν καλώδια. Η τάση αναφοράς για τον ADC είναι σταθερή και ίση με 2.5V και προέρχεται από το ολοκληρωμένο κύκλωμα LM285-2.5 της Texas Instruments [116].

Ο μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό DAC8552

Ο DAC8552 είναι ένας 16-bit DAC της εταιρείας Texas Instruments. Διαθέτει δύο κανάλια για την έξοδο τάσης και η επικοινωνία μαζί του μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες σειριακές διεπαφές. Η μέγιστη υποστηριζόμενη συχνότητα του ρολογιού που χρησιμοποιείται κατά τη σειριακή επικοινωνία είναι 30 MHz. Η τάση τροφοδοσίας του DAC μπορεί να είναι από 2.7 έως 5.5 V, ενώ η τάση αναφοράς πρέπει να προσφερθεί εξωτερικά και η μέγιστη τιμή της ισούται με την τάση τροφοδοσίας. Η μέγιστη τάση στα κανάλια εξόδου του DAC είναι ίση με την τάση αναφοράς. Επιπλέον, η τάση στην έξοδο παραμένει 0 κατά την έναρξη λειτουργίας και μέχρι να δοθεί η εντολή για την έξοδο μιας διαφορετικής τιμής. Η κατανάλωση ενέργειας είναι μικρή και ίση με 0.5 mW για κάθε κανάλι όταν η τάση τροφοδοσίας είναι 2.7 V, ενώ προσφέρεται και λειτουργία απενεργοποίησης της συσκευής η οποία ρίχνει την κατανάλωση σε μόλις 1 μW. Κατά τη λειτουργία απενεργοποίησης, η κατανάλωση ρεύματος για τάση 5 V είναι 700 nA. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται το διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του DAC8552, καθώς και ένα γενικό σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του.



Σχήμα 3.5: (α) Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του DAC8552, καθώς και (β) σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του.

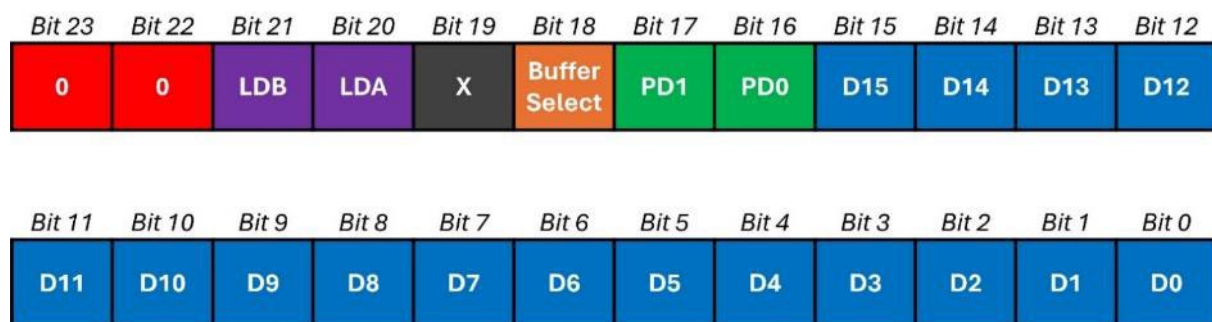
Και στα δύο κανάλια εξόδου του DAC υπάρχει ένα δίκτυο με ίσες μεταξύ τους αντιστάσεις που ακολουθείται από έναν ενισχυτή. Τα δεδομένα που φορτώνονται στον καταχωρητή του DAC καθορίζουν, ελέγχοντας την κατάσταση διακοπών του δικτύου, το σημείο του δικτύου αντιστάσεων από όπου θα επιλεγεί η τάση η οποία τελικά οδηγείται στην είσοδο του ενισχυτή. Η κωδικοποίηση εισόδου για τα δύο κανάλια είναι σε μονοπολική ευθεία δυαδική μορφή, επομένως η ιδανική έξοδος τάσης είναι:

$$V_{OUT} = V_{REF} \times \frac{D}{65536}, \quad (3.1)$$

Κεφάλαιο 3: Υλοποίηση Εξειδικευμένης Πειραματικής Διάταξης

όπου D είναι ο δεκαδικός αριθμός που ισοδυναμεί με τον δυαδικό κωδικό που φορτώνεται στον καταχωρητή του DAC, και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 65535, V_{REF} είναι η τάση αναφοράς, και V_{OUT} η τάση στην έξοδο του καναλιού του DAC.

Για την επικοινωνία με τον DAC8552 είναι διαθέσιμες τρεις γραμμές, που ονομάζονται \overline{SYNC} , SCLK και D_{IN} . Αυτές οι γραμμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποστολή δεδομένων ελέγχου του DAC μέσω διαφόρων διεπαφών επικοινωνίας. Στη διατριβή αυτή χρησιμοποιήθηκε η διεπαφή SPI για τον έλεγχο του DAC από το Raspberry Pi, η οποία περιγράφεται στο Παράρτημα Β. Το σήμα \overline{SYNC} αντιστοιχεί στο σήμα \overline{CS} του SPI, ενώ το σήμα δεδομένων, D_{IN} , στο σήμα MOSI του SPI. Η εισαγωγή δεδομένων στον καταχωρητή μήκους 24-bit του DAC ξεκινάει μόλις η γραμμή \overline{SYNC} γίνει LOW, καθώς η γραμμή είναι active low. Τα δεδομένα εισέρχονται στον καταχωρητή bit προς bit από τη γραμμή D_{IN} σε κάθε καθοδικό μέτωπο του παλμού του ρολογιού, SCLK. Μόλις ο καταχωρητής γεμίσει με 24 bits, αμέσως αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα 8 πιο σημαντικά bits (MSBs) χρησιμοποιούνται ως bits ελέγχου, ενώ τα 16 λιγότερο σημαντικά bits (LSBs) χρησιμοποιούνται ως bits δεδομένων. Ο DAC δεν περιμένει την αλλαγή της κατάστασης της γραμμής \overline{SYNC} σε HIGH πριν προβεί σε αυτόν τον διαχωρισμό. Ωστόσο, η γραμμή αυτή θα πρέπει να γίνει HIGH και στη συνέχεια ξανά LOW αν είναι επιθυμητή η έναρξη νέας μεταφοράς δεδομένων, καθώς η επικοινωνία ξεκινάει μόνο κατά την ανίχνευση ενός καθοδικού μετώπου του παλμού \overline{SYNC} . Αν πριν την ολοκλήρωση της μεταφοράς όλων των 24 bit η κατάσταση της γραμμής \overline{SYNC} αλλάξει από LOW σε HIGH, τότε η επικοινωνία τερματίζεται και όσα bits είχαν ήδη μεταφερθεί στον καταχωρητή του DAC διαγράφονται. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.6, φαίνεται η οργάνωση των 24 bits στον καταχωρητή του DAC.



Σχήμα 3.6: Η δομή του καταχωρητή εισόδου του DAC8552.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.6, τα bits 16 έως 23 είναι τα bits ελέγχου, ενώ τα bits 0 έως 15 είναι τα bits δεδομένων. Τα πρώτα δύο bits ελέγχου, 23 και 22, πρέπει πάντα να είναι 0 για την ορθή λειτουργία του DAC. Το LDA (bit 20) και το LDB (bit 21) ελέγχουν αν θα υπάρξει μεταφορά δεδομένων (τιμή 1) ή όχι (τιμή 0) στην έξοδο του καναλιού A ή B του DAC αντίστοιχα. Παράλληλα, τα ίδια bits ελέγχουν σε πιο κανάλι θα εφαρμοστεί μια εντολή απενεργοποίησης, εάν έχει δοθεί. Το αν υπάρχει εντολή απενεργοποίησης ή όχι καθορίζεται από τα bits PD1 (bit 17) και PD0 (bit 16). Οι πιθανοί συνδυασμοί τιμών (00, 01, 10 και 11)

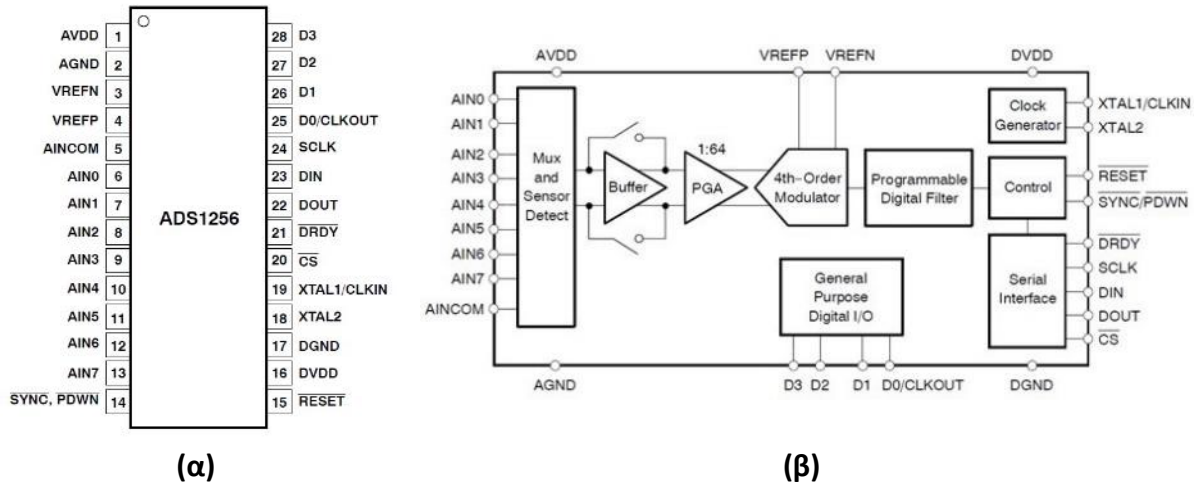
αυτών των bits ορίζουν τέσσερις καταστάσεις, τρεις απενεργοποίησης και μια κανονικής λειτουργίας. Για τους σκοπούς της διατριβής χρησιμοποιήθηκε μόνο η κανονική λειτουργία, η οποία ορίζεται από την τιμή 0 και για τα δύο αυτά bits. Το bit 19 είναι αδιάφορο και είτε είναι 0 είτε 1, η λειτουργία του DAC δεν επηρεάζεται. Το bit Buffer Select (bit 18), καθορίζει τον προορισμό των δεδομένων ή της εντολής απενεργοποίησης μεταξύ της εσωτερικής μνήμης του καναλιού A (τιμή 0) ή B (τιμή 1). Η εντολή απενεργοποίησης ή η μεταφορά δεδομένων στην έξοδο του DAC (αν υπάρχει εντολή κανονικής λειτουργίας) πραγματοποιούνται μόλις το επιτρέψουν τα bit LDA και LDB. Όσο τα LDA και LDB είναι 0, τα δεδομένα και η εντολή απενεργοποίησης ή κανονικής λειτουργίας παραμένουν ανεφάρμοστα στην εσωτερική μνήμη του καναλιού [117].

Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADS1256

Ο ADS1256 είναι ένας υψηλής ακρίβειας 24-bit ADC της εταιρείας Texas Instruments. Περιέχει έναν 4ης τάξης ΔΣ διαμορφωτή ακολουθούμενο από ένα προγραμματιζόμενο ψηφιακό φίλτρο. Ένας ευέλικτος πολυπλέκτης (multiplexer) εισόδου μπορεί να χειριστεί είτε διαφορικά σήματα είτε σήματα μονού άκρου. Ο πολυπλέκτης εισόδου μπορεί να ελέγξει αν υπάρχει είτε ανοιχτό κύκλωμα είτε βραχυκύκλωμα στον εξωτερικό αισθητήρα ή συσκευή από όπου προέρχεται η τάση που εισάγεται σε κάποιο από τα κανάλια του ADC, κάτι που μπορεί να είναι χρήσιμο για τον εντοπισμό βλαβών στον εξωτερικό αισθητήρα ή συσκευή. Ο ADS1256 διαθέτει συνολικά οχτώ κανάλια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την είσοδο τάσης. Επομένως, μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα είτε οχτώ σήματα μονού άκρου είτε τέσσερα διαφορικά σήματα, καθώς στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται δύο κανάλια για την είσοδο ενός σήματος στον ADC. Επιπλέον, ο ADC περιλαμβάνει έναν ενισχυτή προγραμματιζόμενου κέρδους (PGA, Programmable Gain Amplifier) μικρού θορύβου, με τις πιθανές τιμές του κέρδους να είναι μεταξύ 1 και 64 σε βήματα δυνάμεων του 2 (1, 2, 4, 8, 16, 32 ή 64). Το προγραμματιζόμενο φίλτρο επιτρέπει στον χρήστη να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία μεταξύ έως 23 bits χωρίς θόρυβο ή έως 30000 μετρήσεις το δευτερόλεπτο (SPS, Samples Per Second). Στη διάταξη της διατριβής χρησιμοποιήθηκε ρυθμός δειγματοληψίας 10 SPS, ενώ η τιμή του PGA ήταν 1. Με αυτές τις ρυθμίσεις του ADC ο θόρυβος ανέρχεται στα 0.338 μV , και η ανάλυση του ADC, αν εξαιρεθεί ο θόρυβος, ανέρχεται στα 22.3 bits. Με την αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας αυξάνεται και το ύψος του θορύβου, ενώ με την αύξηση της τιμής του PGA το ύψος του θορύβου μειώνεται. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται το PGA η μέγιστη τάση που μπορεί να μετρηθεί από τον ADC ελαττώνεται, καθώς αυτή είναι ίση με $2V_{REF}/PGA$, όπου V_{REF} είναι η τάση αναφοράς του ADC. Η επικοινωνία με τον ADC για τον έλεγχό του και την ανάγνωση δεδομένων γίνεται μέσω της σειριακής διεπαφής SPI. Η προτεινόμενη συχνότητα ρολογιού για την επικοινωνία είναι 7.68 MHz, ενώ η μέγιστη υποστηριζόμενη συχνότητα είναι 10 MHz. Ο ADS1256 τροφοδοτείται με αναλογική τάση μεταξύ 4.75 και 5.25 V, και με ψηφιακή τάση μεταξύ 1.8 και 3.6 V. Για την τάση αναφοράς υπάρχουν δύο είσοδοι, μια για θετική τάση (VREFP) και μια για αρνητική τάση (VREFN). Η

Κεφάλαιο 3: Υλοποίηση Εξειδικευμένης Πειραματικής Διάταξης

τελική τάση αναφοράς υπολογίζεται μέσω της διαφοράς των δύο, με μέγιστη τιμή τα 2.6 V. Η κατανάλωση ενέργειας της συσκευής είναι 38 mW για την κανονική λειτουργία, ενώ προσφέρεται και μια λειτουργία αναμονής κατά την οποία η κατανάλωση πέφτει στα 0.4 mW. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το διάγραμμα εισόδων και εξόδων του ADS1256, καθώς και ένα γενικό σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του.



Σχήμα 3.7: (α) Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του ADS1256, καθώς και (β) σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του.

Από τα 24 bits δεδομένων που χρησιμοποιεί ο ADS1256, 1 bit προσδιορίζει το πρόσημο της τάσης που έχει εισέλθει στο εκάστοτε κανάλι του ADC, επομένως ο δεκαδικός αριθμός που ισοδυναμεί με τη δυαδική κωδικοποίηση της τιμής της τάσης μπορεί να έχει μια μέγιστη τιμή 2^{23} , δηλαδή 8388608. Επιπλέον, η τάση αναφοράς που υπολογίζεται από τη διαφορά τάσης μεταξύ των εισόδων VREFP και VREFN, διπλασιάζεται στο εσωτερικό του ADC. Έτσι, για τον υπολογισμό της τάσης από τα δεδομένα της δυαδικής κωδικοποίησης του ADC μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

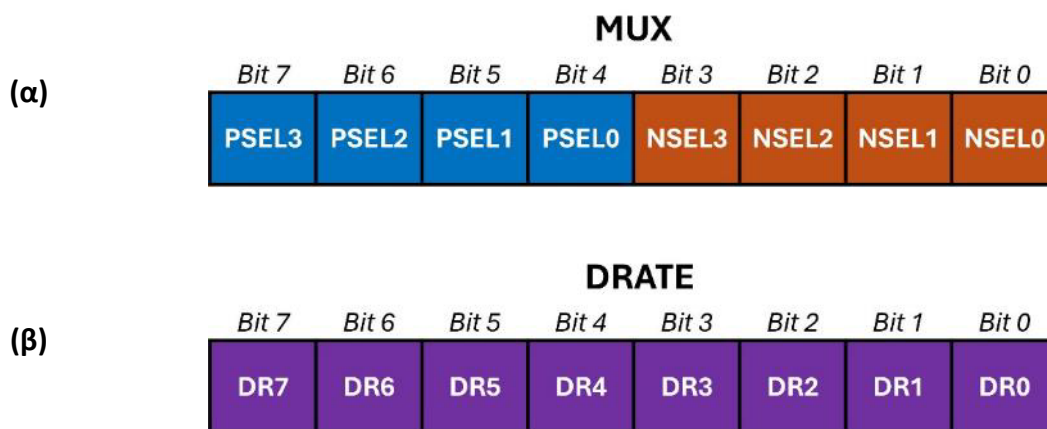
$$V_{in} = 2V_{REF} \times \frac{D}{8388608}, \quad (3.2)$$

όπου V_{in} είναι η τάση στην είσοδο ενός καναλιού του ADC, V_{REF} είναι η τάση αναφοράς, και D είναι ο δεκαδικός αριθμός που ισοδυναμεί με τον δυαδικό κωδικό που επιστρέφει ο ADC, και ο οποίος παίρνει τιμές μεταξύ -8388607 και 8388607.

Ο ADS1256 διαθέτει τέσσερις γραμμές για την αποστολή και λήψη δεδομένων μέσω της διεπαφής SPI. Αυτές οι γραμμές είναι οι \overline{CS} , SCLK, DIN και DOUT, οι οποίες αντιστοιχίζονται με τις γραμμές \overline{CS} , SCLK, MOSI και MISO του SPI αντίστοιχα. Η γραμμή \overline{CS} είναι active low, επομένως η επικοινωνία ξεκινάει μόλις η γραμμή αυτή μεταβεί από κατάσταση HIGH σε κατάσταση LOW. Θα πρέπει να παραμείνει σε αυτήν την κατάσταση για όλη τη διάρκεια μεταφοράς δεδομένων. Αν στον δίαυλο SPI δεν υπάρχουν άλλες συνδεδεμένες συσκευές,

τότε αυτή η γραμμή μπορεί να διατηρείται μόνιμα σε κατάσταση LOW. Τα δεδομένα ρύθμισης του ADC μεταφέρονται bit προς bit μέσω της γραμμής DIN, σε κάθε καθοδικό μέτωπο του παλμού ρολογιού SCLK. Παράλληλα, τα δεδομένα που περιέχουν τη δυαδική κωδικοποίηση της τιμής της τάσης που εισέρχεται σε κάποιο κανάλι του ADC, εξέρχονται bit προς bit από αυτόν μέσω της γραμμής DOUT σε κάθε ανοδικό μέτωπο του παλμού SCLK. Μια επιπλέον γραμμή που ονομάζεται \overline{DRDY} χρησιμοποιείται για να ενημερώσει πότε έχει ολοκληρωθεί η μετατροπή της τάσης σε δυαδική μορφή, και πότε επομένως υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για ανάγνωση από τη συσκευή-master του SPI. Η γραμμή αυτή μεταβαίνει από κατάσταση HIGH σε κατάσταση LOW μόλις η μετατροπή ολοκληρωθεί και τα δεδομένα είναι έτοιμα. Έτσι, μπορεί το \overline{DRDY} να συνδεθεί, για παράδειγμα, σε κάποια από τις ακίδες GPIO του Raspberry Pi, η οποία έχει ρυθμιστεί σαν είσοδος και μπορεί να παρακολουθεί την κατάσταση του \overline{DRDY} . Επομένως, μόλις το Raspberry Pi παρατηρήσει μια μετάβαση του \overline{DRDY} από κατάσταση HIGH σε LOW, μπορεί αμέσως να ξεκινήσει την επικοινωνία με τον ADC για να παραλάβει τα δεδομένα, φέρνοντας το \overline{CS} του ADC σε κατάσταση LOW. Η κατάσταση του \overline{DRDY} γίνεται αυτόματα HIGH μόλις αναγνωστούν και τα 24 bits των δεδομένων. Τέλος, μια ακόμα αξιοσημείωτη γραμμή του ADS1256 είναι η \overline{RESET} . Μια μετάβαση αυτής της γραμμής από κατάσταση HIGH σε LOW επαναφέρει όλους του καταχωρητές του ADC στην προκαθορισμένη κατάστασή τους.

Ο ADS1256 υποστηρίζει πολλές λειτουργίες οι οποίες ελέγχονται με την εισαγωγή των κατάλληλων ρυθμιστικών δεδομένων σε ένα σύνολο από καταχωρητές. Για τους σκοπούς της διατριβής διατηρήθηκαν γενικά οι προκαθορισμένες ρυθμίσεις και χρησιμοποιήθηκε η βασική λειτουργία ανάγνωσης δεδομένων από τον ADC. Για τον σκοπό αυτόν ήταν απαραίτητοι δύο καταχωρητές, οι οποίοι αποκαλούνται MUX και DRATE. Η δομή αυτών των καταχωρητών φαίνεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Η δομή των καταχωρητών (α) MUX και (β) DRATE του ADS1256.

Ο καταχωρητής MUX έχει τη διεύθυνση 0x01 και αποτελείται από τέσσερα bits για τον προσδιορισμό του καναλιού θετικής εισόδου (PSEL1 έως PSEL3), καθώς και τέσσερα ακόμα

για τον προσδιορισμό του καναλιού αρνητικής εισόδου (NSEL1 έως NSEL3). Για σήματα μονής άκρης, μπορεί να οριστεί ένα ένατο κανάλι που ονομάζεται AINCOM ως σημείο αναφοράς, και συνήθως συνδέεται στη γείωση. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει είτε το bit PSEL3 είτε το NSEL3 να γίνει 1. Ο καταχωρητής DRATE έχει διεύθυνση 0x03 και αποτελείται από οχτώ bits που προσδιορίζουν τον ρυθμό δειγματοληψίας του ADC. Ο προκαθορισμένος ρυθμός είναι 30000 SPS, που ορίζεται όταν στον καταχωρητή σχηματίζεται ο αριθμός 0x10. Στα πλαίσια της διατριβής χρησιμοποιήθηκε ρυθμός 10 SPS, ο οποίος ορίζεται με τον σχηματισμό του αριθμού 0x23 από τα bits στο εσωτερικό του καταχωρητή.

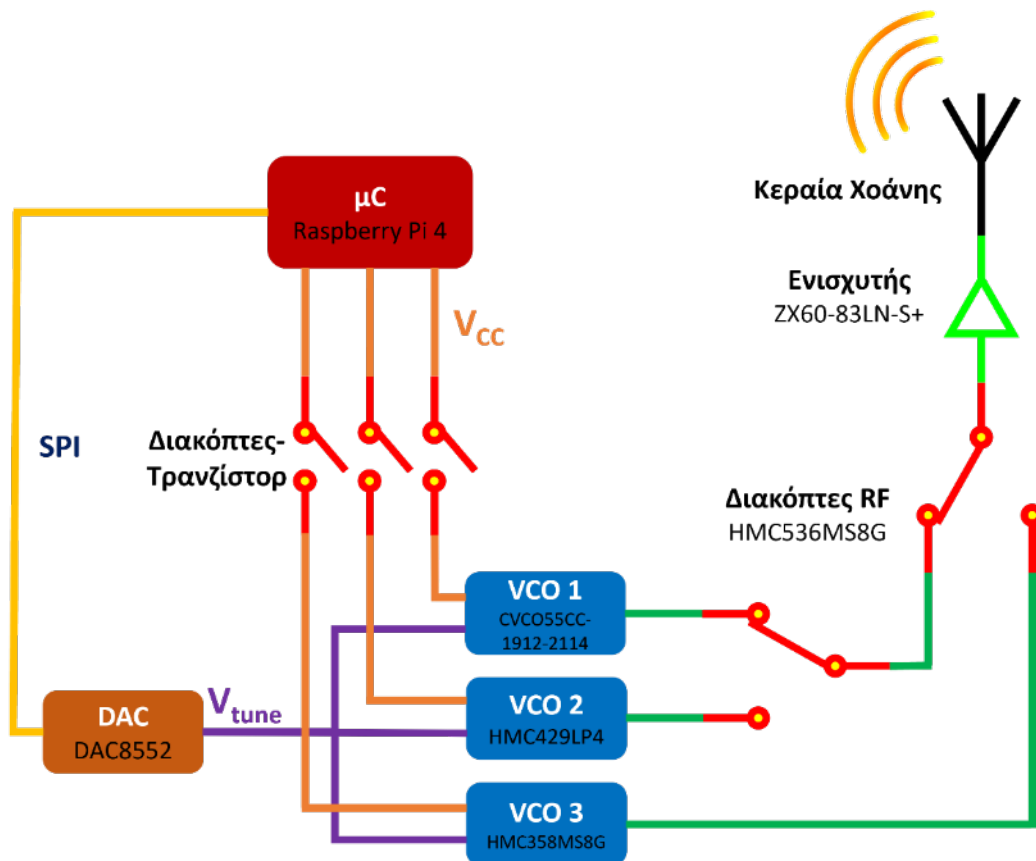
Για την εγγραφή δεδομένων σε συγκεκριμένους καταχωρητές του ADC καθώς και για πολλές ακόμα λειτουργίες είναι απαραίτητη η αποστολή συγκεκριμένων εντολών στον ADC μέσω της διεπαφής SPI. Ο ADC αναγνωρίζει το είδος της εντολής μέσω του πρώτου λαμβανόμενου byte. Για τους σκοπούς της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις βασικές εντολές:

- WREG (0x5r). Η εντολή WREG (write to register) χρησιμοποιείται για την εγγραφή bits σε έναν ή δύο καταχωρητές. Στο byte που την προσδιορίζει, 0x5r, η τιμή r είναι η διεύθυνση του καταχωρητή στον οποίο θα γίνει η εγγραφή, ενώ η διεύθυνση του δεύτερου καταχωρητή όπου μπορεί να γίνει εγγραφή είναι η 0x(r+1). Η εντολή αυτή ακολουθείται από ένα δεύτερο byte της μορφής 0x0n, όπου το n προσδιορίζει το πλήθος των bits που θα εγγραφούν στον επιλεγμένο καταχωρητή.
- SYNC (0xFC). Η εντολή SYNC (synchronize) σταματάει τη λειτουργία του ADC και είναι χρήσιμη για λόγους συγχρονισμού, όταν δηλαδή είναι απαραίτητη η μετατροπή μιας τάσης σε δυαδική μορφή κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Μετά από αυτήν την εντολή πρέπει πάντα να ακολουθήσει η εντολή WAKEUP. Μόλις φορτωθεί η εντολή WAKEUP, στο πρώτο ανοδικό μέτωπο του παλμού SCLK που έπεται, πραγματοποιείται ο συγχρονισμός και μπορούν να αναγνωστούν τα δεδομένα στην έξοδο του ADC μόλις γίνουν διαθέσιμα (μετάβαση του \overline{DRDY} σε κατάσταση LOW).
- WAKEUP (0x00 ή 0xFF). Η εντολή WAKEUP χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την εντολή SYNC για την ολοκλήρωση του συγχρονισμού της μετατροπής μιας τάσης σε δυαδική τιμή.
- RDATA (0x01). Η εντολή RDATA (Read Data) μπορεί να αποσταλεί στον ADC όταν η γραμμή \overline{DRDY} γίνει LOW, ώστε να αναγνωστεί το αποτέλεσμα της μετατροπής μιας τιμής τάσης σε δυαδική κωδικοποίηση.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, οι εντολές αυτές χρησιμοποιήθηκαν με τη σειρά που έχουν αναγραφεί. Η εντολή WREG χρησιμοποιήθηκε μόνο κατά την αρχικοποίηση του ADC, για τη ρύθμιση του ρυθμού δειγματοληψίας (10 SPS) και των καναλιών εισόδου του ADC όπου έπρεπε να μετρηθεί η τάση. Η αρχικοποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε με την εγγραφή των κατάλληλων ρυθμιστικών bits στους καταχωρητές MUX και DRATE. Με την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης, για κάθε μέτρηση εκτελούνταν οι εντολές SYNC και WAKEUP για τον συγχρονισμό της μετατροπής μιας τάσης σε δυαδική μορφή, και τελικά η εντολή RDATA για τη μέτρηση της τάσης [118].

3.3 Υλοποίηση του συστήματος του πομπού

Η εξειδικευμένη πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε αποτελείται από δύο βασικά συστήματα, έναν πομπό και έναν δέκτη. Ο πομπός ήταν υπεύθυνος για την εκπομπή σήματος στις συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz, το οποίο τελικά λαμβάνονταν από τον δέκτη όπου και μετρούνταν η ισχύς του. Γενικά, ο πομπός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπομπή σε συχνότητες από 1.9 έως 2.1 GHz, από 4.2 έως 4.8 GHz και από 5.6 έως 6.6 GHz. Το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος του πομπού φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος του πομπού.

Η όλη λειτουργία του πομπού ελέγχεται από έναν μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 4 Model B. Αρχικά, ο πομπός αναμένει μια εντολή από τον δέκτη σχετικά με τη συχνότητα στην οποία πρέπει να εκπέμψει. Η τρεις συχνότητες, 2.07, 4.63 και 6.22 GHz παράγονται από τρεις ταλαντωτές ελεγχόμενους από τάση (VCO, Voltage Controlled Oscillator). Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, η συχνότητα εκπομπής του κάθε VCO ελέγχεται από μια ρυθμιστική τάση (V_{tune}). Για την παραγωγή της ρυθμιστικής τάσης υπεύθυνος είναι ένας DAC, ο DAC8552, ο οποίος περιλαμβάνεται στην πλακέτα επέκτασης του Raspberry Pi 4 η οποία περιγράφεται στην Ενότητα 3.2.4. Έτσι λοιπόν, μόλις ο πομπός λάβει την εντολή από τον δέκτη να εκπέμψει σε μια συγκεκριμένη από τις τρεις συχνότητες, αρχικά ενεργοποιεί την τροφοδοσία του VCO ο οποίος αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ η τροφοδοσία για τους άλλους δύο

VCOs διατηρείται απενεργοποιημένη. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιούνται τρεις διακόπτες, ένας για κάθε VCO, οι οποίοι υλοποιήθηκαν μέσω διπολικών τρανζίστορ (BJT, Bipolar Junction Transistor). Κάθε διακόπτης αντιστοιχεί σε έναν VCO και η κατάστασή του ελέγχεται από συγκεκριμένες ακίδες GPIO του Raspberry Pi. Στη συνέχεια, ο πομπός, γνωρίζοντας τη ρυθμιστική τάση που απαιτείται σε κάθε VCO για την εκπομπή σε κάθε μια από τις τρεις επιθυμητές συχνότητες, στέλνει ένα μήνυμα ελέγχου στον DAC μέσω της διεπαφής SPI που διαθέτει το Raspberry Pi. Με αυτό το μήνυμα ελέγχου ο DAC ρυθμίζεται ώστε να προσφέρει στην έξοδο του την κατάλληλη ρυθμιστική τάση, η οποία και οδηγείται στον VCO. Ύστερα, αφού ο VCO είναι πλέον ενεργοποιημένος και παράλληλα δέχεται στην είσοδό του την τάση αυτή, παράγει στην έξοδό του ένα σήμα της επιθυμητής συχνότητας. Για τον διαχωρισμό των εξόδων των τριών VCO χρησιμοποιήθηκαν δύο διακόπτες RF, οι οποίοι εξασφαλίζουν πως, ανά πάσα στιγμή, μόνο η έξοδος ενός από τους VCO είναι συνδεδεμένη με την έξοδο του πομπού. Η κατάσταση και αυτών των διακοπτών ελέγχεται από συγκεκριμένες ακίδες GPIO του Raspberry Pi. Στο Σχήμα 3.9, οι τρεις VCOs αποκαλούνται VCO 1, VCO 2 και VCO 3, και ο καθένας τους είναι υπεύθυνος για την εκπομπή σήματος συχνότητας 2.07, 4.63 και 6.22 GHz αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ο ένας από τους διακόπτες RF επιλέγει μεταξύ της εξόδου του VCO 1 και του VCO 2, ενώ ο δεύτερος διακόπτης RF επιλέγει μεταξύ της εξόδου του πρώτου διακόπτη RF και του VCO 3. Έπειτα, αφού το σήμα του επιλεγμένου VCO οδηγηθεί προς την έξοδο του πομπού μέσω του ορισμού της κατάλληλης κατάστασης σε κάθε διακόπτη RF, αρχικά ενισχύεται, και στη συνέχεια καταλήγει σε μια κεραία χοάνης η οποία και το εκπέμπει στον αέρα. Τέλος, όταν το σήμα βρίσκεται πια στον αέρα, ο πομπός στέλνει ένα μήνυμα στον δέκτη και τον ενημερώνει πως εκπέμπει στη συγκεκριμένη συχνότητα. Μετά από περίπου 1 δευτερόλεπτο, ο πομπός λαμβάνει μια νέα εντολή από τον δέκτη, για τη μετάβαση και εκπομπή στην επόμενη από τις τρεις συχνότητες. Στο σημείο αυτό, ο πομπός επαναλαμβάνει την όλη διαδικασία για τη νέα αυτή συχνότητα.

3.3.1 Το υλικό μέρος του συστήματος του πομπού

Στην ενότητα αυτή, περιγράφονται τα διάφορα μέρη από τα οποία απαρτίζεται το σύστημα του πομπού, με εξαίρεση την πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board του Raspberry Pi, που περιλαμβάνει τον DAC DAC8552, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της συχνότητας εκπομπής μέσω της παροχής της απαραίτητης ρυθμιστικής τάσης σε κάθε έναν από τους τρεις VCOs. Η περιγραφή της πλακέτας αυτής έχει συμπεριληφθεί στην Ενότητα 3.2.4. Επιπλέον, στην παρούσα ενότητα περιγράφονται δύο πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος που σχεδιάστηκαν, καθώς και ο τρόπος διασύνδεσης των διαφόρων μερών του συστήματος.

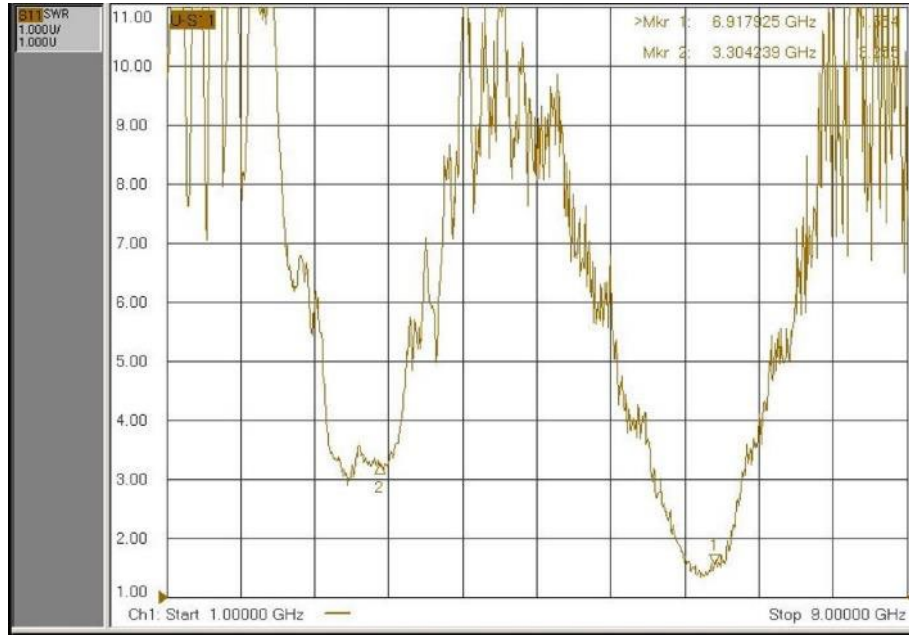
Η κεραία χοάνης

Για την εκπομπή του σήματος από τον πομπό χρησιμοποιήθηκε μια κεραία χοάνης που μπορούσε να υποστηρίξει τις επιθυμητές συχνότητες εκπομπής. Η κεραία αυτή φαίνεται στην εικόνα του Σχήματος 3.10.

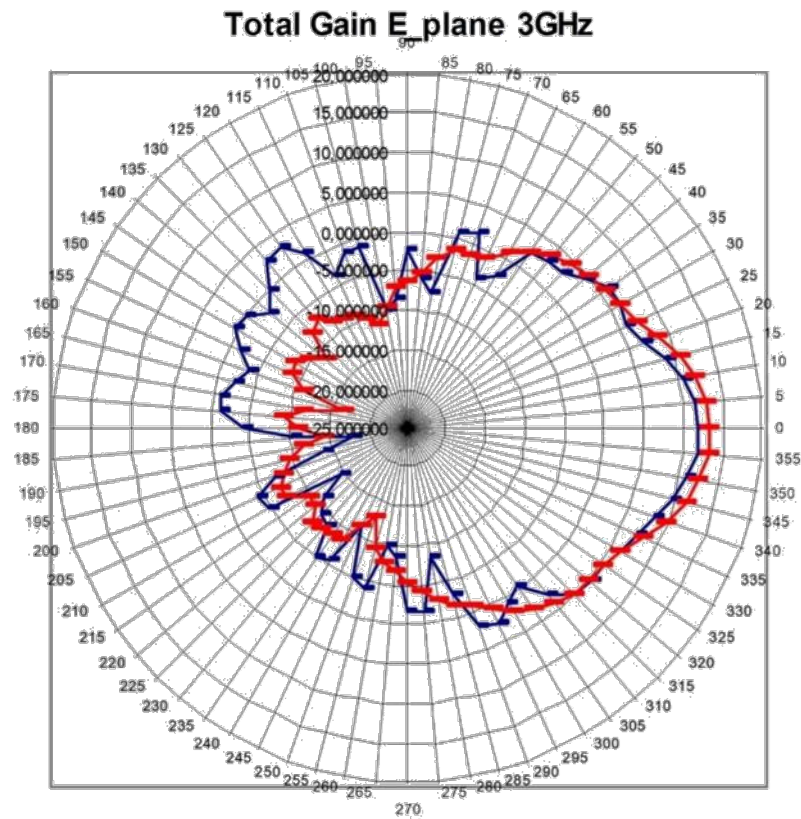


Σχήμα 3.10: Η κεραία χοάνης που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα του πομπού.

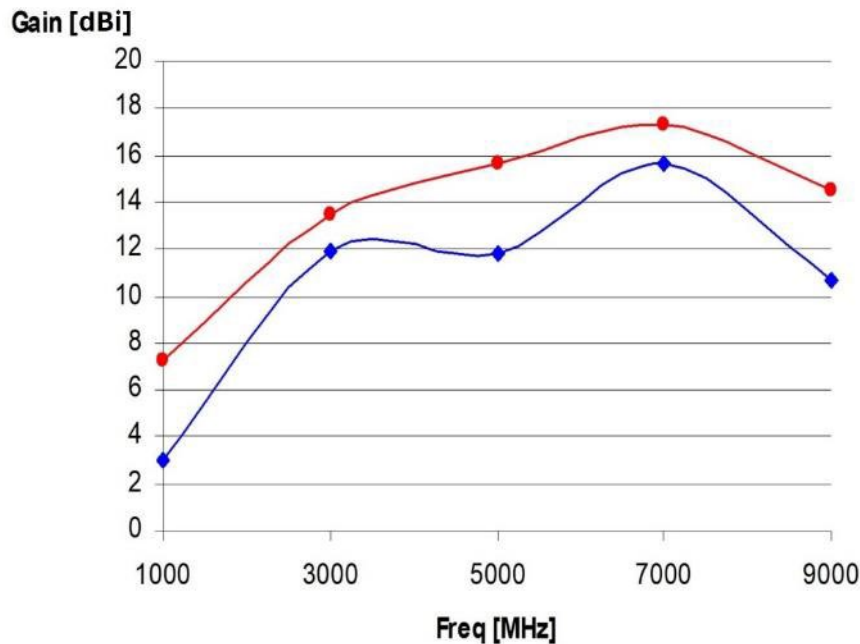
Η κεραία αυτή, είναι συγκεκριμένα κεραία ορθογώνιας χοάνης, η οποία εμφανίζει μέγιστη αποδοτικότητα σε συχνότητες της περιοχής των 3.3 και 6.9 GHz. Σε αυτές τις περιοχές η τιμή του VSWR είναι περίπου 3.2 και 1.5 αντίστοιχα, κάτι που υποδηλώνει πως από το σήμα που οδηγείται στην κεραία περίπου 80% και 50% αντίστοιχα φτάνει σε αυτή, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται. Για τις υπόλοιπες συχνότητες, από 1 έως 9 GHz, το VSWR είναι γενικά κάτω από 10, δηλαδή σε κάθε περίπτωση φτάνει στην κεραία, χωρίς να ανακλάται, τουλάχιστον το 18% του σήματος. Η κεραία διαθέτει έναν ορθογώνιο κυματοδηγό στο σημείο εισόδου του σήματος, είναι κατευθυντική και εμφανίζει μέγιστο κέρδος 17.4 dBi για συχνότητα 7 GHz. Για συχνότητες άνω των 2 GHz το κέρδος διατηρείται σταθερά σε τιμές ανώτερες των 10 dBi. Όλες αυτές οι πληροφορίες φαίνονται και από τα σχήματα που ακολουθούν. Στο Σχήμα 3.11, φαίνεται το διάγραμμα VSWR της κεραίας για κάθε συχνότητα από 1 έως 9 GHz, στο Σχήμα 3.12 απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας στο αζιμουθιακό επίπεδο, και τέλος, στο Σχήμα 3.13, περιλαμβάνεται η μεταβολή του κέρδους της κεραίας ως προς τη συχνότητα στο εύρος από 1 έως 9 GHz [119].



Σχήμα 3.11: Ο λόγος στάσιμου κύματος της κεραίας χοάνης για συχνότητες από 1 έως 9 GHz.



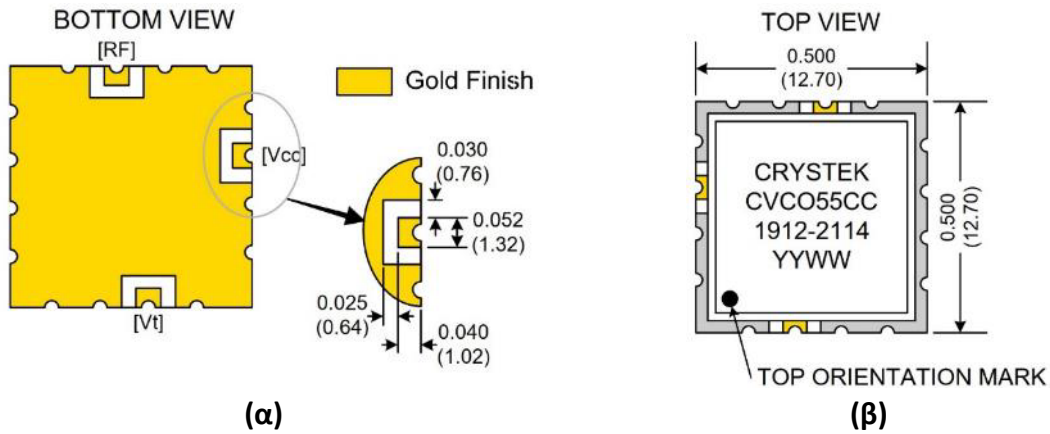
Σχήμα 3.12: Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας χοάνης στο αζιμουθιακό επίπεδο παρουσία του κυματοδηγού (κόκκινο) καθώς και όταν δεν χρησιμοποιείται κυματοδηγός (μπλε).



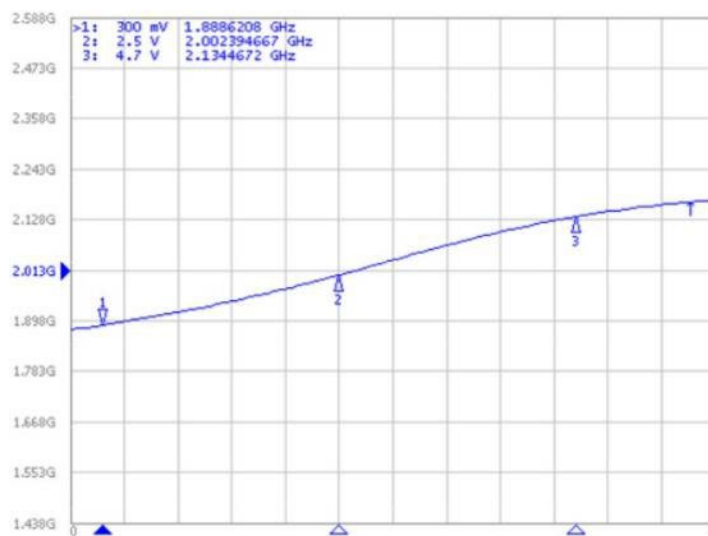
Σχήμα 3.13: Το κέρδος της κεραίας χοάνης για συχνότητες από 1 έως 9 GHz, παρουσία του κυματοδηγού (κόκκινο), καθώς και όταν δεν χρησιμοποιείται κυματοδηγός (μπλε).

Ο ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση CVCO55CC-1912-2114

Το σύστημα του πομπού, για την εκπομπή σήματος συχνότητας 2.07 GHz χρησιμοποιεί τον CVCO55CC-1912-2114, έναν VCO της εταιρείας Crystek. Όπως φαίνεται και από το όνομα του VCO, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σημάτων συχνότητας από περίπου 1900 έως 2100 MHz κατά την τυπική του λειτουργία. Τροφοδοτείται με τάση στο εύρος από 4.75 έως 5.25 V, ενώ για τάση 5 V, η τυπική κατανάλωση ρεύματος είναι 15 mA. Η ισχύς του παραγόμενου σήματος είναι μεταξύ -3 και 3 dBm, ενώ, για τον έλεγχο της συχνότητας εκπομπής, ο VCO δέχεται ρυθμιστική τάση (V_{tune}) με τυπικές τιμές μεταξύ 0.3 και 4.7 V. Η εμπέδηση της εξόδου του είναι 50 Ω, και λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -40 έως +85°C. Μια γενική εικόνα από την κάτω και την πάνω πλευρά του VCO μαζί με τις εισόδους και την έξοδό του φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Η είσοδος τάσης τροφοδοσίας αναγράφεται ως V_{cc} , η είσοδος της ρυθμιστικής τάσης ως V_{t} , και η έξοδος του σήματος ως RF. Όλη η ενιαία περιοχή που φαίνεται με κίτρινο χρώμα στο σχήμα αποτελεί τη γείωση του VCO. Επιπλέον, το κίτρινο χρώμα αντιστοιχεί σε όλα τα σημεία του VCO όπου υπάρχει επικάλυψη χρυσού. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.15 περιλαμβάνεται το διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας εκπομπής ως προς τη ρυθμιστική τάση που δέχεται ο VCO [120].



Σχήμα 3.14: Γενική απεικόνιση της (α) κάτω και της (β) πάνω πλευράς του CVCO55CC-1912-2114, με την είσοδο τροφοδοσίας (VCC), ρυθμιστικής τάσης (Vt), και την έξοδό του (RF).

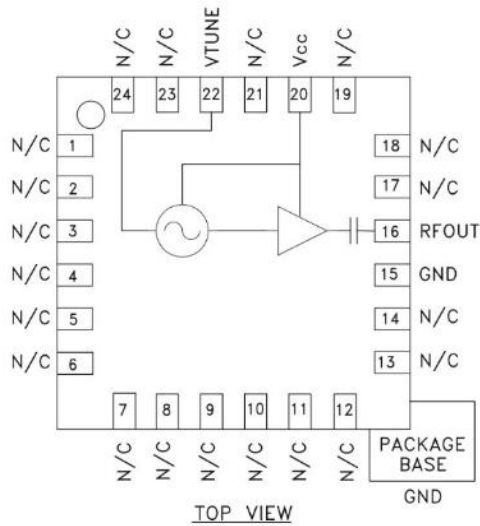


Σχήμα 3.15: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της συχνότητας του σήματος εκπομπής του CVCO55CC-1912-2114 (κάθετος άξονας) ως προς τη ρυθμιστική τάση (οριζόντιος άξονας).

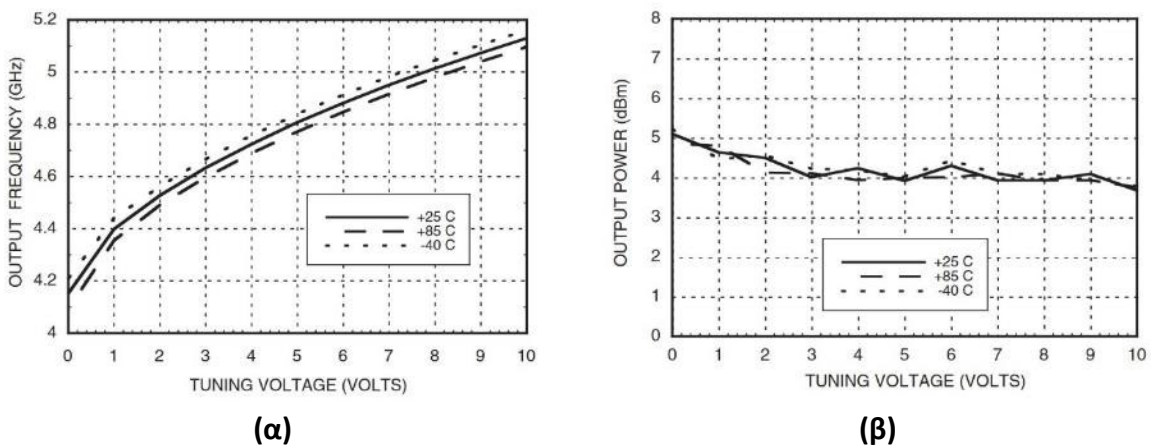
Ο ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση HMC429LP4

Ο δεύτερος VCO που χρησιμοποιεί ο πομπός για την εκπομπή σε συχνότητα 4.63 GHz είναι ο HMC429LP4 της εταιρείας Analog Devices. Ο συγκεκριμένος VCO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπομπή σημάτων συχνότητας από 4.45 έως 5 GHz. Η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεταξύ 1 και 4 dBm. Για τον έλεγχο της συχνότητας εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρυθμιστική τάση (V_{tune}) από 0 έως 10 V. Τροφοδοτείται με τάση 3 V, και η τυπική κατανάλωση ρεύματος είναι 30 mA. Η εμπέδηση της εξόδου του VCO είναι 50 Ω. Οι υποστηριζόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι από -40 έως +85°C. Το διάγραμμα των εισόδων και της εξόδου του VCO φαίνεται στο Σχήμα 3.16, όπου η τάση τροφοδοσίας αναγράφεται ως Vcc, η γείωση ως GND, η ρυθμιστική τάση ως VTUNE, και η έξοδος σήματος ως RFOUT. Ως, N/C αναγράφονται σημεία που δεν είναι απαραίτητο να συνδεθούν κάπου,

και τα οποία μπορούν να γειωθούν. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.17, ακολουθεί μια γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της συχνότητας του σήματος εκπομπής ως προς τη ρυθμιστική τάση, καθώς και της μεταβολής της ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος ως προς τη ρυθμιστική τάση [121].



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα των εισόδων τροφοδοσίας (V_{cc} και GND) και ρυθμιστικής τάσης ($VTUNE$), καθώς και της εξόδου σήματος ($RFOUT$) του $HMC429LP4$. Τα σημεία N/C δεν συνδέονται εσωτερικά στο κύκλωμα.



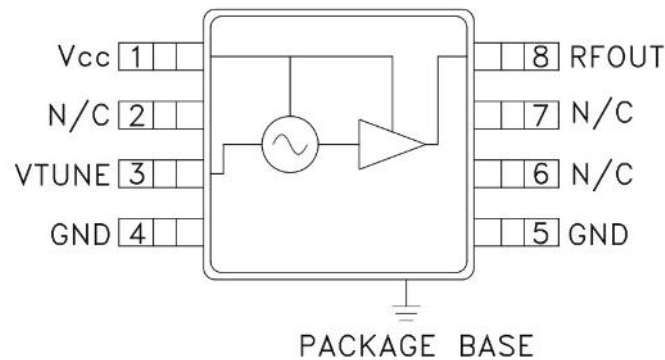
Σχήμα 3.17: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της **(α)** συχνότητα και της **(β)** ισχύος του σήματος εκπομπής του $HMC429LP4$ (κάθετος άξονας) ως προς τη ρυθμιστική τάση (οριζόντιος άξονας).

Ο ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση HMC358MS8G

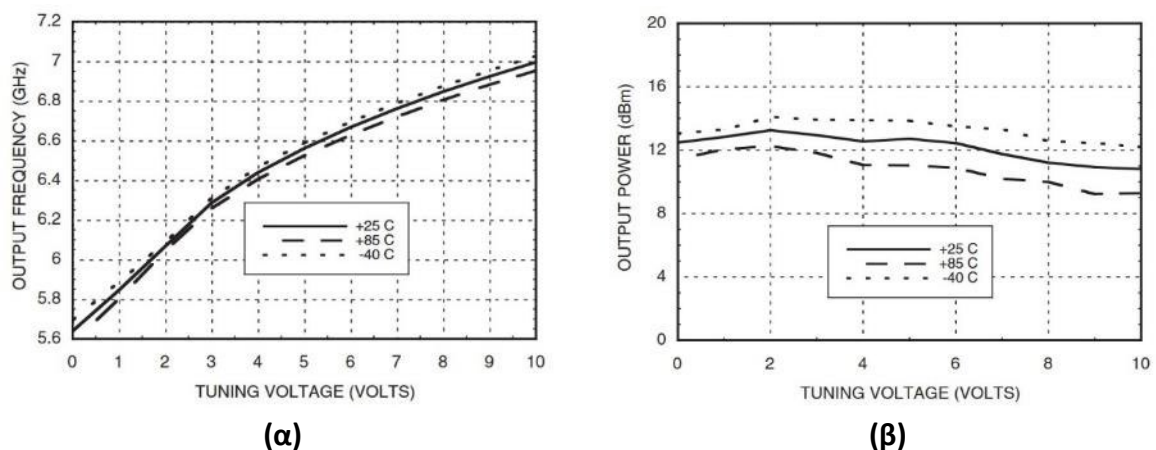
Ο τρίτος VCO μέσω του οποίου ο πομπός μπορεί να εκπέμψει σήμα συχνότητας 6.22 GHz, είναι ο $HMC358MS8G$, της εταιρείας Analog Devices. Ο $HMC429LP4$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπομπή σημάτων στην περιοχή συχνοτήτων από 5.8 έως 6.8 GHz,

Κεφάλαιο 3: Υλοποίηση Εξειδικευμένης Πειραματικής Διάταξης

ενώ η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος βρίσκεται στο εύρος μεταξύ 8 και 11 dBm. Για τον έλεγχο της συχνότητας εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρυθμιστική τάση (V_{tune}) από 0 έως 10 V. Ο VCO τροφοδοτείται με τάση 3 V, και η τυπική κατανάλωση ρεύματος ανέρχεται στα 100 mA. Η εμπέδηση της εξόδου του VCO είναι 50 Ω. Οι υποστηριζόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι από -40 έως $+85^{\circ}\text{C}$. Το διάγραμμα των εισόδων και της εξόδου του VCO φαίνεται στο Σχήμα 3.18, όπου η τάση τροφοδοσίας αναγράφεται ως V_{CC} , η γείωση ως GND, η ρυθμιστική τάση ως VTUNE και η έξοδος σήματος ως RFOUT. Ως, N/C αναγράφονται και πάλι σημεία τα οποία δεν συνδέονται εσωτερικά στο κύκλωμα και μπορούν να γειωθούν. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.19, ακολουθεί μια γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της συχνότητας του σήματος εκπομπής ως προς τη ρυθμιστική τάση, καθώς και της μεταβολής της ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος ως προς τη ρυθμιστική τάση [122].



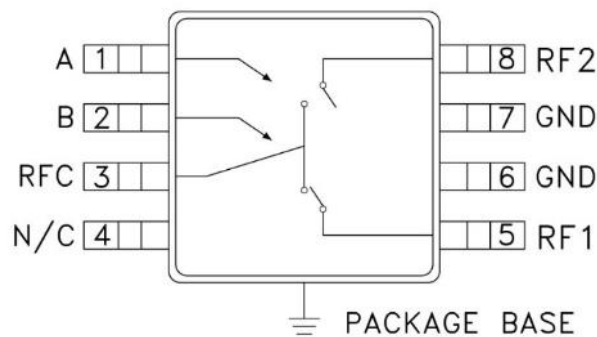
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα των εισόδων τροφοδοσίας (V_{CC} και GND) και ρυθμιστικής τάσης ($VTUNE$), καθώς και της εξόδου σήματος ($RFOUT$) του HMC358MS8G. Τα σημεία N/C δεν συνδέονται εσωτερικά στο κύκλωμα.



Σχήμα 3.19: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της (α) συχνότητας και της (β) ισχύος του σήματος εκπομπής του HMC358MS8G (κάθετος άξονας) ως προς τη ρυθμιστική τάση (οριζόντιος άξονας).

Ο διακόπτης RF HMC536MS8G

Για την εξασφάλιση πως μόνο η έξοδος του ενεργού VCO συνδέεται ανά πάσα στιγμή στη γραμμή μεταφοράς η οποία οδηγεί προς την κεραία του πομπού χρησιμοποιήθηκαν δύο διακόπτες HMC536MS8G. Ο HMC536MS8G είναι ένας διακόπτης RF της εταιρείας Analog Devices, ο οποίος υποστηρίζει συχνότητες στο εύρος από 0 (DC) έως περίπου 6 GHz, και οι απώλειες στις οποίες υπόκειται το σήμα όταν διέρχεται από αυτόν είναι ελάχιστες, μεταξύ 0.5 και 1 dB. Διαθέτει τρία σημεία για την είσοδο ή έξοδο σήματος (RFC, RF1 και RF2), με την εμπέδηση καθενός από αυτά να είναι 50 Ω. Έτσι, ανάλογα με την κατάσταση του διακόπτη, ένα εισερχόμενο σήμα μπορεί να ακολουθήσει μια από δύο πιθανές διαδρομές, είτε μεταξύ των σημείων RFC και RF1 είτε μεταξύ των σημείων RFC και RF2. Ένα τυπικό εύρος τιμών της απομόνωσης που προσφέρει ο διακόπτης μεταξύ της γραμμής RFC και των γραμμών RF1 ή RF2 είναι από 27 έως 32 dB. Ο διακόπτης μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες από -40 έως +85°C. Στο Σχήμα 3.20 απεικονίζεται το διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του HMC536MS8G.



Σχήμα 3.20: Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του HMC536MS8G.

Για τον έλεγχο της κατάστασης του διακόπτη χρησιμοποιούνται δύο σήματα ελέγχου στις εισόδους A και B. Οι εισόδους αυτές δέχονται τάσεις δύο επιπέδων, HIGH ή LOW. Ως LOW ορίζεται μια τάση 0 V, ενώ ως HIGH ορίζεται μια τάση μεταξύ 3 και 5 V. Το ρεύμα που καταναλώνει κάθε μια από τις εισόδους A και B, είτε η τάση αντιστοιχεί στο επίπεδο HIGH είτε στο επίπεδο LOW, είναι 25 μ A. Η διαδρομή που θα ακολουθήσει το σήμα μέσα στον διακόπτη καθορίζεται από το ποια είσοδος είναι HIGH και ποια LOW. Όταν για την τιμή HIGH χρησιμοποιείται τάση 3 V, η μέγιστη δυνατή ισχύς του σήματος για την οποία μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ο διακόπτης είναι 29 dBm, ενώ όταν χρησιμοποιείται τάση 5 V, η μέγιστη δυνατή ισχύς σήματος ανέρχεται στα 34 dBm. Με την αλλαγή του επιπέδου τάσης των εισόδων A και B, ο διακόπτης μπορεί να μεταβαίνει από τη μια κατάσταση του στην άλλη τάχιστα, με τον χρόνο που απαιτείται για την εναλλαγή αυτή να είναι 30 ns. Οι δύο δυνατές καταστάσεις του διακόπτη ανάλογα με το επίπεδο τάσης στις εισόδους A και B περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3.3 [123].

Πίνακας 3.2: Οι δύο πιθανές καταστάσεις του διακόπτη HMC536MS8G ανάλογα με το επίπεδο τάσης στις εισόδους A και B.

A	B	Διαδρομή Σήματος
LOW	HIGH	Μεταξύ RFC και RF1
HIGH	LOW	Μεταξύ RFC και RF2

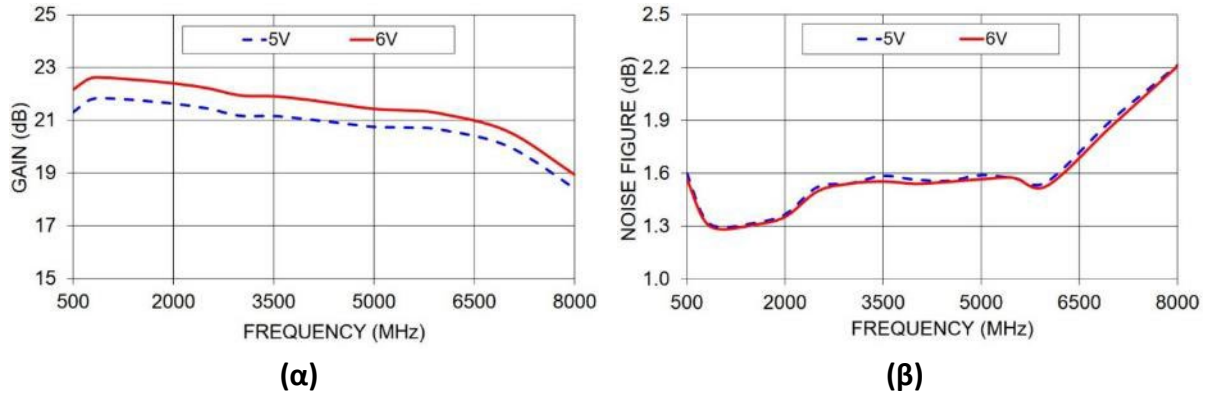
Ο ενισχυτής ZX60-83LN-S+

Για την ενίσχυση του σήματος στο τελευταίο στάδιο πριν καταλήξει στην κεραία χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής ZX60-83LN-S+, της εταιρείας Mini-Circuits. Ο ενισχυτής αυτός μπορεί να υποστηρίξει σήματα συχνοτήτων από 0.5 έως 8 GHz. Η ενίσχυση που προσφέρει εξαρτάται από τη συχνότητα και ανήκει στο εύρος τιμών από 18.7 έως 22.1 dB. Επιπλέον, ο θόρυβος που υπεισέρχεται στο σήμα από τον ενισχυτή είναι μικρός, με τις τιμές του noise figure, κατά πόσο δηλαδή ενισχύεται ο θόρυβος, να είναι μεταξύ 1.4 και 2.2 dB. Κατά τη χρήση του για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα η ισχύς του σήματος στην είσοδο του ενισχυτή μπορεί να φτάσει μέχρι 16 dBm. Για την τροφοδοσία του απαιτείται τάση 5 ή 6 V και η τυπική κατανάλωση ρεύματος σε κάθε περίπτωση είναι 77 ή 60 mA αντίστοιχα. Μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες από -40 έως +85°C. Στα σημεία εισόδου και εξόδου σήματος, ο ενισχυτής προσφέρει ομοαξονικές υποδοχές SMA (Subminiature version A), ενώ για την εφαρμογή της τάσης τροφοδοσίας και της γείωσης υπάρχουν δύο σημεία με τη μορφή ακίδων. Μια γενική φωτογραφία του ZX60-83LN-S+ φαίνεται στο Σχήμα 3.21, ενώ στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.22 ακολουθεί μια γραφική απεικόνιση του κέρδους του ενισχυτή καθώς και του noise figure ως προς τη συχνότητα σήματος [124].



Σχήμα 3.21: Γενική φωτογραφία του ZX60-83LN-S+.

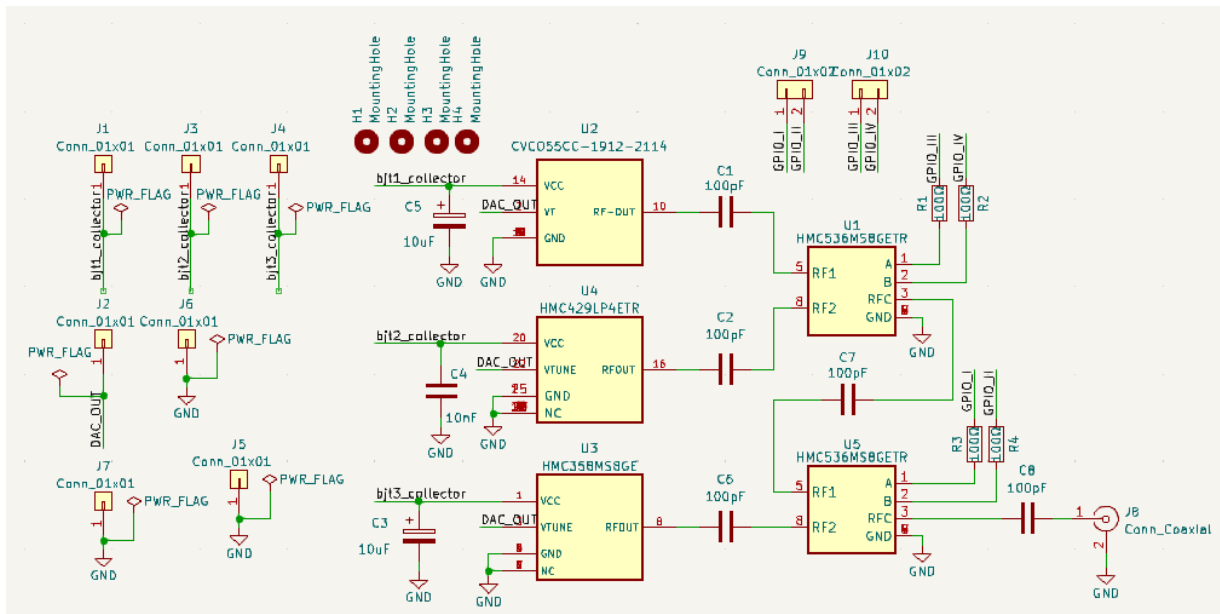
3.3 Υλοποίηση του συστήματος του πομπού



Σχήμα 3.22: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής του (α) κέρδους και του (β) noise figure (κάθετος άξονας) του ZX60-83LN-S+ ως προς τη συχνότητα (οριζόντιος άξονας).

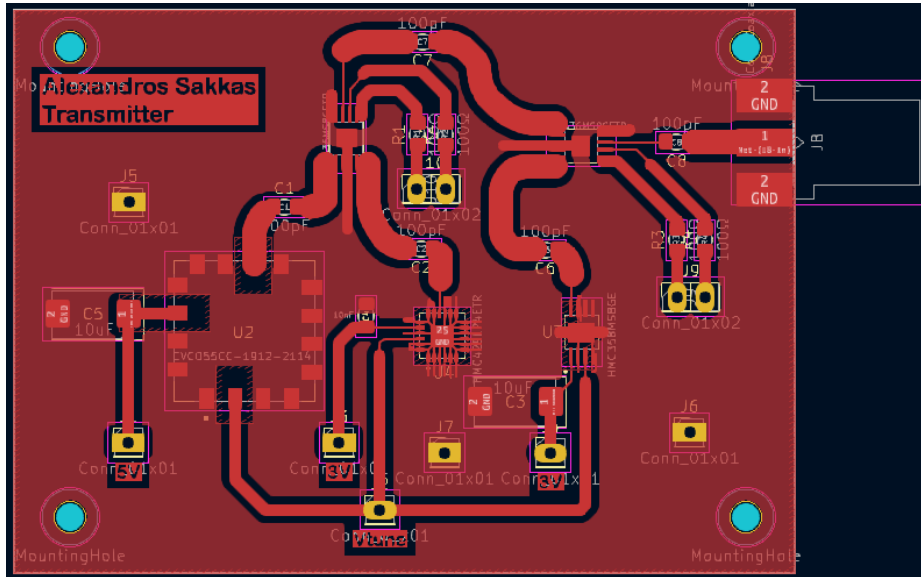
Υλοποίηση πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος για τους τρεις ταλαντωτές ελεγχόμενους από τάση

Οι τρεις VCOs, CVC055CC-1912-2114, HMC429LP4 και HMC358MS8G, οι οποίοι περιεγράφηκαν στις προηγούμενες σελίδες και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπομπή σήματος σε συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz αντίστοιχα, τοποθετήθηκαν σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB, Printed Circuit Board) η οποία αρχικά σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad και στη συνέχεια υλοποιήθηκε στην πράξη. Στην πλακέτα συμπεριλήφθηκαν και οι δύο διακόπτες RF, HMC536MS8G, που χρησιμοποιήθηκαν. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας φαίνεται στο Σχήμα 3.23, όπως σχεδιάστηκε με τον Schematic Editor του KiCad.

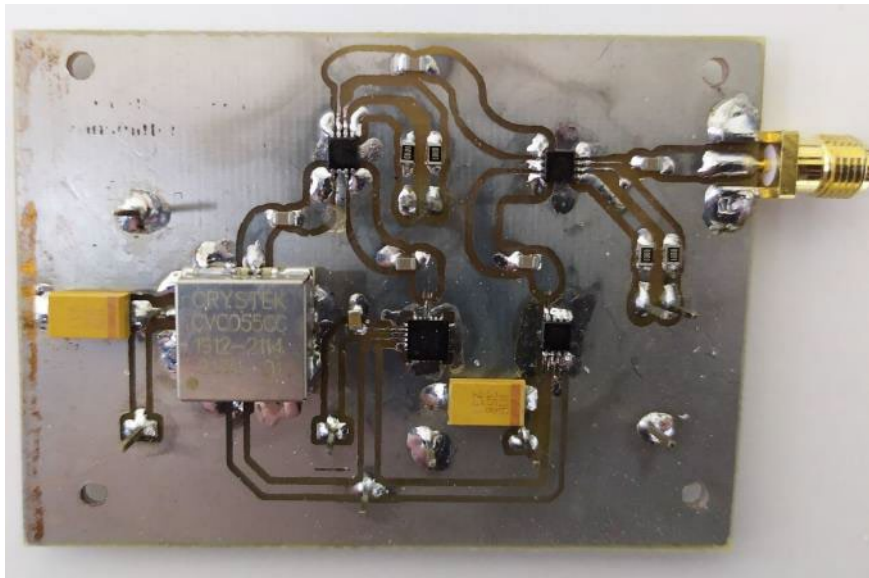


Σχήμα 3.23: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας του πομπού με τους τρεις VCOs όπως σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad.

Όλα τα σύμβολα που αναγράφονται ως J αποτελούν ακίδες. Σύμφωνα με το σχηματικό διάγραμμα του σχήματος, η τροφοδοσία του CVCO55CC-1912-2114 προέρχεται από την ακίδα J1, ενώ για τον HMC429LP4 και τον HMC358MS8G η τροφοδοσία συνδέεται στις ακίδες J3 και J4 αντίστοιχα. Όπως υπονοείται και από την ονομασία της γραμμής της τροφοδοσίας, αυτή προέρχεται από τον συλλέκτη κάποιων διπολικών τρανζίστορ. Τα τρανζίστορ αυτά είναι εκείνα που λειτουργούν ως διακόπτες και βρίσκονται σε μια δεύτερη πλακέτα που περιγράφεται παρακάτω. Στην περίπτωση του CVCO55CC-1912-2114 ο οποίος χρειάζεται τροφοδοσία 5 V, αυτή παρέχεται από τον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi, ενώ στην περίπτωση των HMC429LP4 και HMC358MS8G, η τροφοδοσία με τάση 3 V παρέχεται από έναν ρυθμιστή τάσης που βρίσκεται στην πλακέτα των διακοπών-τρανζίστορ. Και στις τρεις περιπτώσεις, η τροφοδοσία περνάει αρχικά από αυτούς του διακόπτες όπως περιγράφεται παρακάτω. Η ρυθμιστική τάση VTUNE συνδέεται στην ακίδα J2 και για τους τρεις VCOs. Καθώς μόνο ένας VCO είναι ενεργοποιημένος ανά πάσα στιγμή, δεν προκαλούνται παρεμβολές από εκπομπές των άλλων δύο VCOs. Η πλακέτα περιλαμβάνει τρεις ακίδες γείωσης (GND), τις J5, J6 και J7. Στην είσοδο της τάσης τροφοδοσίας του κάθε VCO έχει τοποθετηθεί ένας, σε κάθε περίπτωση, πυκνωτής χωρητικότητας είτε 10 μF είτε 100 μF , που οδηγεί στη γείωση. Σκοπός των πυκνωτών αυτών είναι η εξάλειψη του θορύβου. Στην υλοποίηση της πλακέτας οι πυκνωτές τοποθετήθηκαν κοντά στον κάθε VCO για να έχουν καλύτερα αποτελέσματα. Οι δύο διακόπτες RF HMC536MS8G ελέγχουν ποιος VCO θα συνδεθεί με την έξοδο της πλακέτας, όπου έχει συμπεριληφθεί ένα ομοαξονικό βύσμα SMA, το J8, η εμπέδηση του οποίου είναι 50 Ω . Ο πρώτος διακόπτης RF επιλέγει μεταξύ της εξόδου του CVCO55CC-1912-2114 και του HMC429LP4, και την οδηγεί στη μια από τις δύο εισόδους του δεύτερου διακόπτη RF. Η άλλη έξοδος του δεύτερου διακόπτη RF επιλέγει μεταξύ της εξόδου του πρώτου διακόπτη και της εξόδου του HMC358MS8G. Και για τους δύο διακόπτες, τόσο στα σημεία εισόδου όσο και εξόδου έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές χωρητικότητας 100 pF. Ο σκοπός αυτών των πυκνωτών είναι η αποκοπή μιας πιθανής DC συνιστώσας του σήματος. Τα σημεία ελέγχου της κατάστασης των δύο διακοπών (A και B) δέχονται τάση η οποία εισάγεται στις ακιδοσειρές J9 για τον έναν διακόπτη και J10 για τον άλλον. Οι ακιδοσειρές αυτές περιλαμβάνουν δύο ακίδες η καθεμιά. Στα σημεία A και B κάθε διακόπτη έχει τοποθετηθεί από μια αντίσταση 100 Ω , για την προστασία τους. Το ομοαξονικό βύσμα SMA για την έξοδο του σήματος προς την κεραία τοποθετείται στο πλάι της πλακέτας. Διαθέτει συνολικά πέντε ακίδες, εκ των οποίων τέσσερις είναι γειώσεις και μία η έξοδος σήματος. Δύο από τις ακίδες γείωσης κολλήθηκαν στην κάτω πλευρά της τελικής υλοποιημένης πλακέτας, ενώ οι υπόλοιπες τρεις στην πάνω πλευρά. Οι VCOs αλλά και οι διακόπτες RF περιείχαν σημεία που δεν συνδέονταν εσωτερικά στο κύκλωμά τους. Για ευκολία κατά την κόλληση, όλα αυτά τα σημεία συνδέθηκαν στη γείωση της πλακέτας. Στο Σχήμα 3.24 που ακολουθεί φαίνεται το σχέδιο της πλακέτας όπως έγινε στον PCB Editor του KiCad, καθώς και η τοπολογία των εξαρτημάτων, ενώ στο Σχήμα 3.25 περιλαμβάνεται μια φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας.



Σχήμα 3.24: Το σχέδιο της πλακέτας των τριών VCO του πομπού και η τοπολογία των εξαρτημάτων της στον PCB Editor του KiCad.

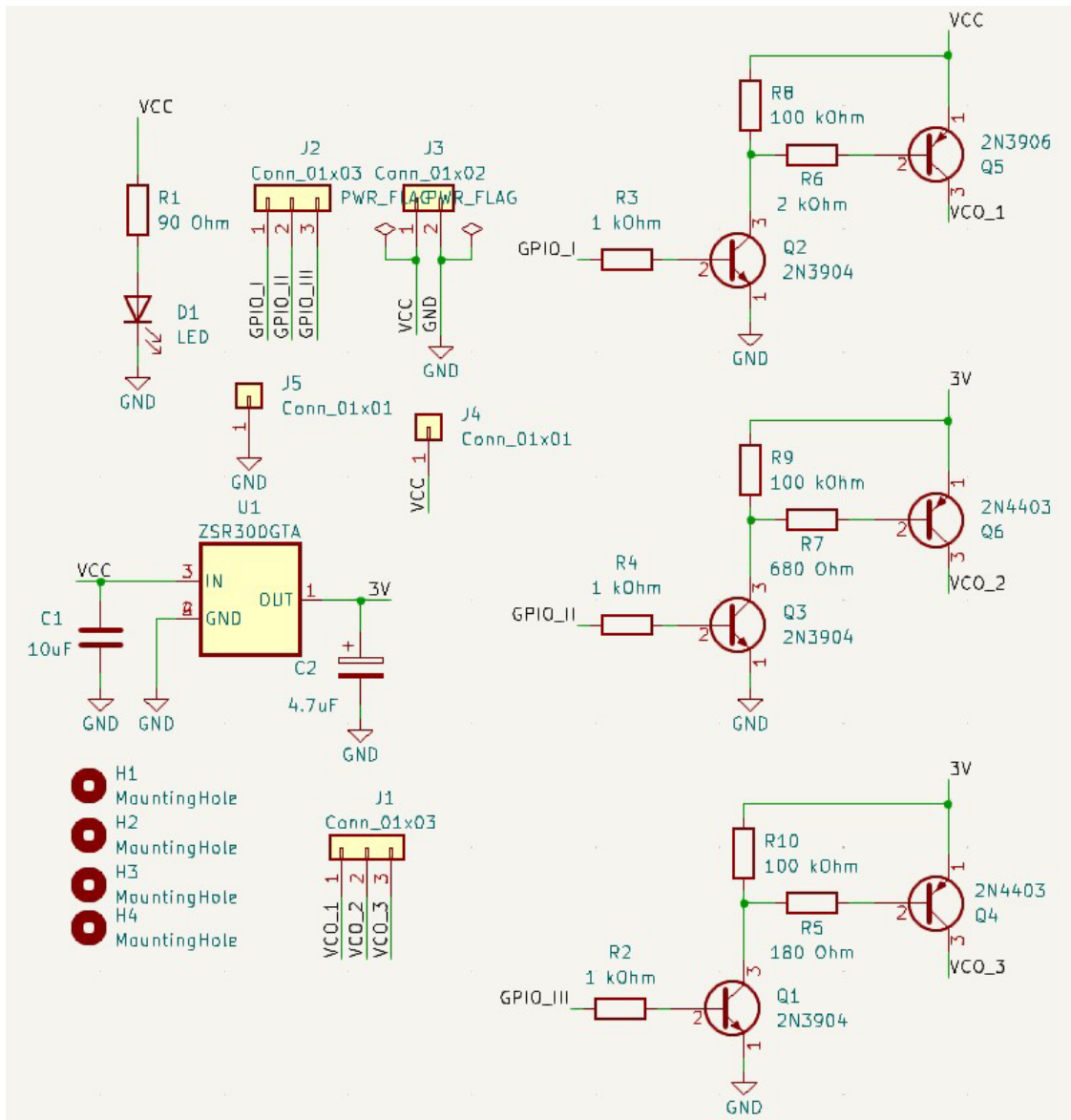


Σχήμα 3.25: Φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας των τριών VCOs του πομπού.

Υλοποίηση πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος με διακόπτες για τον έλεγχο της τροφοδοσίας κάθε VCO

Για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κάθε VCO ώστε να εξασφαλιστεί πως μόνο ένας είναι ενεργός σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, κάτι που είναι απαραίτητο για τη διασφάλιση πως δεν θα υπάρχουν τυχόν παρεμβολές μεταξύ τους, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια ακόμα πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος. Η πλακέτα αυτή περιλαμβάνει τρεις διακόπτες, έναν για κάθε VCO, οι οποίοι υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας διπολικά τρανζίστορ (BJT). Η πλακέτα

σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας, στον Schematic Editor του KiCad, φαίνεται στο Σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας των τριών διακοπών-τρανζίστορ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κάθε VCO, όπως σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.26, κάθε διακόπτης αποτελείται από ένα ζεύγος τρανζίστορ, ένα τρανζίστορ PNP (Q4, Q5 και Q6) στο στάδιο της εξόδου του διακόπτη (VCO_1, VCO_2, VCO_3), καθώς και ένα τρανζίστορ NPN (Q1, Q2 και Q3) στο στάδιο εισόδου του σήματος ελέγχου του διακόπτη (GPIO_I, GPIO_II, GPIO_III). Ένας διακόπτης μπορεί να υλοποιηθεί γενικά χρησιμοποιώντας μόνο ένα τρανζίστορ. Στην πλακέτα αυτή, το τρανζίστορ NPN κάθε ζεύγους χρησιμοποιείται ως προστασία για τις ακίδες GPIO του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της κατάστασης του διακόπτη.

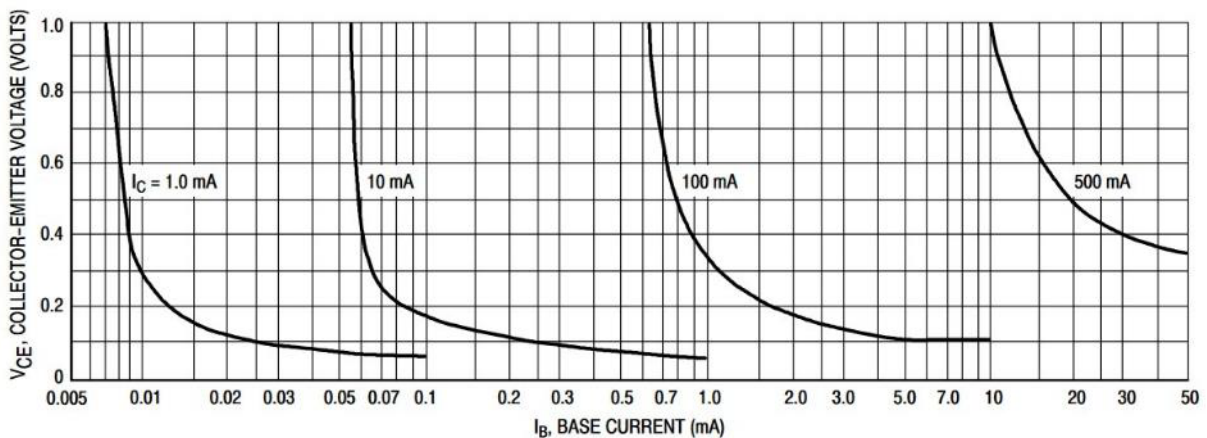
Ο πρώτος VCO, CVCO55CC-1912-2114, χρειάζεται τάση τροφοδοσίας 5 V η οποία προσφέρεται απευθείας από τις ακίδες του Raspberry Pi, ενώ οι άλλοι δύο VCOs, HMC429LP4 και HMC358MS8G, χρειάζονται τάση τροφοδοσίας 3 V. Για συντομία, οι τρεις VCOs, CVCO55CC-1912-2114, HMC429LP4 και HMC358MS8G, θα αναγράφονται στη συνέχεια ως VCO1, VCO2 και VCO3 αντίστοιχα (η έξοδος των διακοπών προς κάθε VCO έχει αναγράφει αντίστοιχα ως VCO_1, VCO_2 και VCO_3 στο σχήμα). Για την τάση τροφοδοσίας 3 V που απαιτείται για τους VCO2 και VCO3 χρησιμοποιήθηκε ο ρυθμιστής τάσης ZSR300, της εταιρείας Zetex Semiconductors. Όπως αναγράφεται και στο σχηματικό διάγραμμα, αυτός τροφοδοτείται με τάση 5 V και προσφέρει στην έξοδο του σταθερή τάση 3 V και μέγιστο ρεύμα 200 mA [125]. Στο σχηματικό, η τάση των 5 V που προέρχεται απευθείας από τις διαθέσιμες ακίδες του Raspberry Pi, αναγράφεται ως VCC. Η τάση αυτή συνδέεται στην είσοδο του πρώτου διακόπτη (τρανζίστορ Q2 και Q5) που προορίζεται για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του VCO1, σε μια δίοδο LED (D1) η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ένδειξη πως το κύκλωμα τροφοδοτείται, και στον ρυθμιστή τάσης (U1). Κοντά στον ρυθμιστή τάσης έχουν τοποθετηθεί δύο πυκνωτές χωρητικότητας 10 μF στην είσοδο, και 4.7 μF στην έξοδο, με σκοπό την εξάλειψη τυχόν θορύβου. Η έξοδος τάσης 3 V του ρυθμιστή συνδέεται στους άλλους δύο διακόπτες (τρανζίστορ Q3 και Q6, και τρανζίστορ Q1 και Q4), που προορίζονται για τον έλεγχο της τροφοδοσίας των VCO2 και VCO3.

Κάθε ένας από τους διακόπτες ελέγχεται από διαφορετικές ακίδες GPIO του Raspberry Pi, με την εφαρμογή τάσης επιπέδου HIGH ή LOW στη βάση του NPN τρανζίστορ κάθε ζεύγους, κάτι που ελέγχει τη ροή ή μη ρεύματος σε αυτήν και, επομένως, αν το τρανζίστορ είναι ενεργοποιημένο ή απενεργοποιημένο. Τα σημεία εφαρμογής αυτής της τάσης ελέγχου αναγράφονται στο σχήμα ως GPIO_I, GPIO_II και GPIO_III. Η κατάσταση του τρανζίστορ PNP σε κάθε ζεύγος εξαρτάται και αυτή από την κατάσταση του τρανζίστορ NPN όπως περιγράφεται παρακάτω. Στην περίπτωση του Raspberry Pi τα επίπεδα τάσης HIGH και LOW αναλογούν σε τιμές 3.3 και 0 V αντίστοιχα. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να προσφερθεί από τις ακίδες GPIO είναι 16 mA, το οποίο ήταν αρκετό στο συγκεκριμένο κύκλωμα για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των τρανζίστορ που χρησιμοποιήθηκαν. Τα τρανζίστορ μέσω των οποίων υλοποιήθηκαν οι διακόπτες λειτουργούν όλα στην περιοχή αποκοπής όταν ο διακόπτης είναι απενεργοποιημένος, και στην περιοχή κορεσμού όταν ο διακόπτης είναι ενεργοποιημένος.

Τα δύο βασικά τρανζίστορ που χρησιμοποιήθηκαν στο στάδιο της εξόδου τάσης προς τους VCOs, είναι τα 2N3906 για τον VCO1, και 2N4403 για τους VCO2 και VCO3, της εταιρείας ON Semiconductor [126,127]. Τα τρανζίστορ αυτά είναι τα PNP του κάθε ζεύγους. Σε ένα PNP τρανζίστορ, η συσκευή της οποίας είναι επιθυμητή η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της τροφοδοσίας, στην προκειμένη περίπτωση ο VCO, συνδέεται μεταξύ του συλλέκτη και της γείωσης. Αυτό αποτέλεσε και το βασικό κριτήριο για την επιλογή των τρανζίστορ, καθώς είναι σημαντικό σε κυκλώματα RF να υπάρχει υψηλής ποιότητας γείωση. Έτσι, χρησιμοποιώντας PNP τρανζίστορ, η γείωση κάθε VCO συνδέεται απευθείας στην κοινή γείωση όλου του

συστήματος και παραμένει σταθερή. Αυτό δεν ισχύει για τρανζίστορ NPN. Στην περίπτωση των τρανζίστορ NPN ο VCO θα συνδέονταν μεταξύ της εισόδου τάσης και του συλλέκτη του τρανζίστορ. Καθώς η γείωση του VCO θα συνδέονταν στον συλλέκτη, δεν θα ήταν ακριβώς 0, αλλά κατά μια μικρή τάση πάνω από το 0, ίση με τη διαφορά δυναμικού μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού (V_{CE}). Αν και αυτή η τάση ελαχιστοποιείται όταν το τρανζίστορ λειτουργεί βαθιά στην περιοχή κορεσμού δεν γίνεται ποτέ ακριβώς 0.

Το δεύτερο κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των τρανζίστορ ήταν το ρεύμα συλλέκτη (I_C) που μπορούσαν να παρέχουν όταν λειτουργούν στην περιοχή κορεσμού, καθώς αυτό το ρεύμα πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες κατανάλωσης των VCOs. Σε συνδυασμό με αυτό εξετάστηκε και ένα τελευταίο κριτήριο, η τιμή της διαφοράς δυναμικού V_{CE} στην περιοχή κορεσμού για την αντίστοιχη τιμή του I_C . Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να βρεθούν στα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών του κάθε τρανζίστορ. Για παράδειγμα, ο VCO2 καταναλώνει ρεύμα 30 mA. Έτσι, επιλέχθηκε το τρανζίστορ 2N4403 λόγω της συμπεριφοράς του στην περιοχή του κορεσμού η οποία φαίνεται από τις καμπύλες στο Σχήμα 3.27.



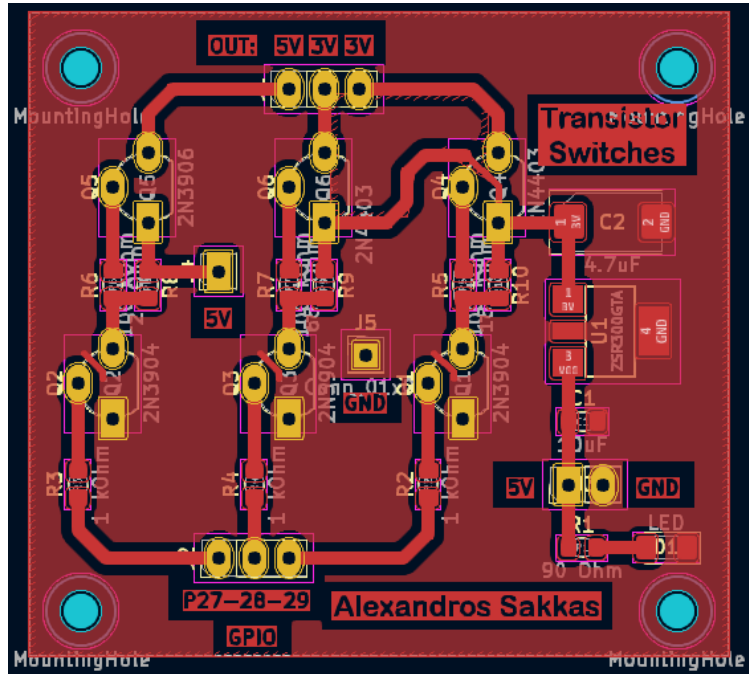
Σχήμα 3.27: Γραφική απεικόνιση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού (V_{CE} , κάθετος άξονας) ως προς το ρεύμα βάσης (I_B , οριζόντιος άξονας) για διάφορες τιμές του ρεύματος συλλέκτη (I_C), για το τρανζίστορ 2N4403.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.27, καθώς ο VCO2 καταναλώνει ρεύμα 30 mA, θα μπορούσε κανείς να επιλέξει την τρίτη καμπύλη του σχήματος ($I_C = 100$ mA) για τον σχεδιασμό του κυκλώματος του διακόπτη, εξασφαλίζοντας πως το τρανζίστορ μπορεί να παρέχει ρεύμα έως 100 mA. Η τάση τροφοδοσίας του VCO2 θα είναι $3\text{ V} - V_{CE}$, όπου 3 V είναι η τάση που εφαρμόζεται στον εκπομπού του τρανζίστορ. Η ελαχιστοποίηση του V_{CE} είναι επομένως κρίσιμη. Σύμφωνα με την καμπύλη, το V_{CE} ελαχιστοποιείται όταν το ρεύμα βάσης (I_B) είναι τουλάχιστον 5 mA. Έτσι, χρησιμοποιώντας αυτήν τη συλλογιστική πορεία για κάθε διακόπτη, καθώς και μέσω προσομοιώσεων στο περιβάλλον προσομοιώσεων Multisim, προσδιορίστηκαν οι τιμές των αντιστάσεων ώστε το κάθε τρανζίστορ να οδηγηθεί βαθιά μέσα στην περιοχή κορεσμού για την ελαχιστοποίηση του V_{CE} . Παράλληλα μέσω των

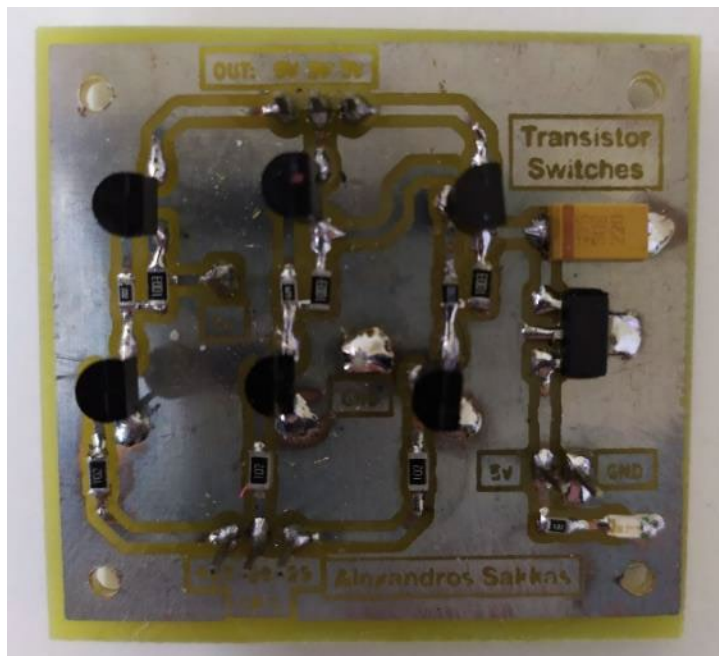
προσομοιώσεων εξακριβώθηκε πως με τις τιμές αντιστάσεων που επιλέχθηκαν καλύπτονται οι ανάγκες κατανάλωσης ρεύματος για κάθε VCO.

Στην περίπτωση και των τριών διακοπών, το τρανζίστορ που χρησιμοποιήθηκε για την προστασία των ακίδων GPIO ήταν το 2N3904 της εταιρείας ON Semiconductor [128]. Αυτό είναι και το NPN τρανζίστορ σε κάθε ζεύγος. Η χρήση αυτής της προστασίας ήταν απαραίτητη γιατί αν η τάση που εφαρμόζεται στον εκπομπό του PNP τρανζίστορ ξεπεράσει την τάση που εφαρμόζεται στη βάση του μέσω της ακίδας GPIO, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της τάσης των 5 V που απαιτούνται για έναν από τους τρεις VCOs, τότε ρεύμα θα κατευθυνθεί προς την ακίδα αυτή, διατηρώντας το τρανζίστορ συνεχώς ενεργοποιημένο, ενώ υπάρχει και ο κίνδυνος να προκληθεί ζημιά στον μικροϋπολογιστή. Η παρουσία ενός NPN τρανζίστορ αμέσως μετά την ακίδα, αποτρέπει την κατεύθυνση ρεύματος προς αυτήν.

Σε κάθε διακόπτη, η έξοδος τάσης προς τον VCO προσφέρεται στον συλλέκτη των τρανζίστορ PNP. Εκεί τοποθετήθηκε μια ακιδοσειρά τριών ακίδων (J1). Η κατάσταση κάθε διακόπτη καθορίζεται από την τάση στην έξοδο της αντίστοιχης ακίδας GPIO. Όταν η έξοδος είναι LOW (0 V), τότε η έξοδος του διακόπτη μηδενίζεται, ενώ όταν είναι HIGH, τότε στην έξοδο του διακόπτη προσφέρεται η αντίστοιχη τροφοδοσία. Στην κατάσταση HIGH, ρεύμα ρέει στη βάση του τρανζίστορ NPN του κάθε ζεύγους διακοπών. Έτσι, το τρανζίστορ ενεργοποιείται. Αφού το τρανζίστορ NPN είναι ενεργοποιημένο, η βάση του τρανζίστορ PNP του ζεύγους γειώνεται μέσω αυτού. Κατά συνέπεια, καθώς το ρεύμα στη βάση του τρανζίστορ PNP μηδενίζεται, ενεργοποιείται με τη σειρά του και αυτό, διότι η λογική ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του τρανζίστορ αυτού είναι αντίστροφη από αυτήν του NPN. Στη συνέχεια, ρεύμα ρέει στον εκπομπό του τρανζίστορ PNP και προς τον συλλέκτη όπου βρίσκεται συνδεδεμένη η είσοδος τροφοδοσίας του VCO. Έτσι, ο VCO ενεργοποιείται. Η αντίστροφη διαδικασία συμβαίνει όταν στη βάση του τρανζίστορ NPN εφαρμόζεται τάση επιπέδου LOW από την αντίστοιχη ακίδα GPIO. Τότε, η βάση του NPN γειώνεται μέσω της ακίδας, επομένως το ρεύμα που ρέει προς αυτήν μηδενίζεται. Κατ' επέκταση, η σύνδεση της βάσης του τρανζίστορ PNP με την γείωση κόβεται, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος προς αυτήν, προερχόμενο από τον εκπομπό όπου έχει εφαρμοστεί η σταθερή τάση 5 ή 3 V, όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος. Η ροή ρεύματος στην βάση του PNP τρανζίστορ προκαλεί την απενεργοποίησή του. Σε αυτήν την κατάσταση δεν υπάρχει ροή ρεύματος μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη. Επομένως, καθώς το σημείο εισόδου τάσης του VCO συνδέεται στον συλλέκτη του τρανζίστορ, ο VCO τελικά απενεργοποιείται. Για να εξασφαλιστεί πως η είσοδος ελέγχου των διακοπών δεν είναι ποτέ σε κατάσταση FLOAT, χρησιμοποιήθηκαν μεγάλης τιμής (100 kΩ) αντιστάσεις pull-up (R8, R9 και R10) μεταξύ της βάσης των PNP τρανζίστορ και της τάσης που εφαρμόζεται στον εκπομπό τους. Στο Σχήμα 3.28 που ακολουθεί φαίνεται το σχέδιο της πλακέτας όπως έγινε στον PCB Editor του KiCad, καθώς και η τοπολογία των εξαρτημάτων, ενώ στο Σχήμα 3.29 περιλαμβάνεται μια φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας.



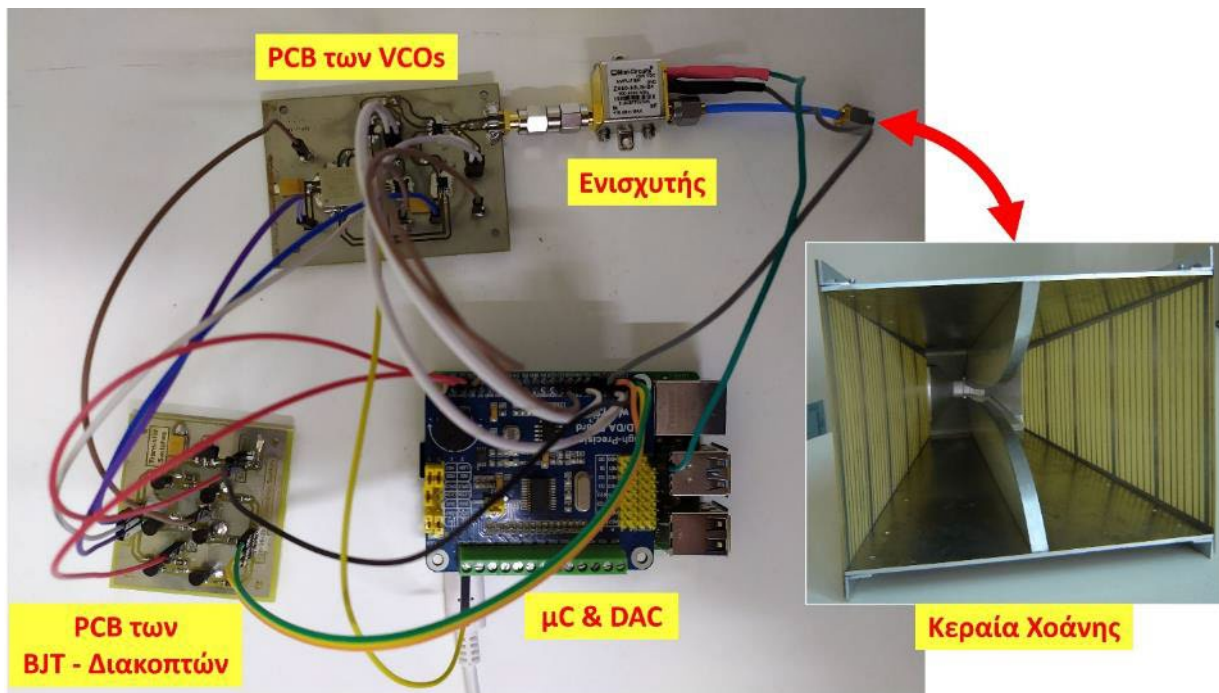
Σχήμα 3.28: Το σχέδιο της πλακέτας των τριών διακοπών-τρανζίστορ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κάθε VCO, καθώς και η τοπολογία των εξαρτημάτων στον PCB Editor του KiCad.



Σχήμα 3.29: Φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας των τριών διακοπών-τρανζίστορ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κάθε VCO.

Διασύνδεση των διαφόρων μερών του συστήματος του πομπού

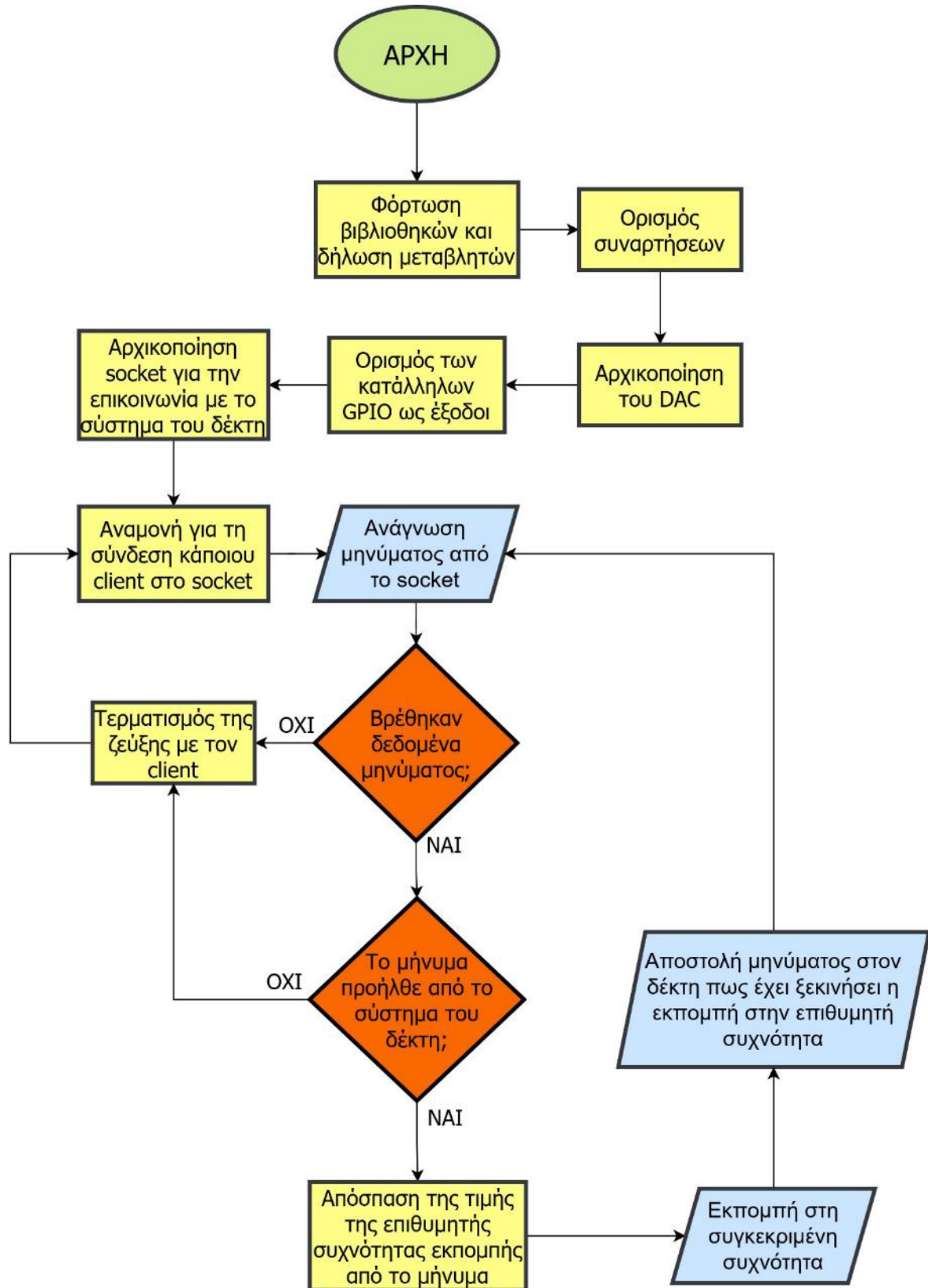
Στην τελική, υλοποιημένη μορφή του συστήματος του πομπού, η πλακέτα επέκτασης του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi (High-Precision AD/DA Board) τοποθετήθηκε πάνω στον μικροϋπολογιστή, κουμπώνοντας πάνω στην ακιδοσειρά GPIO. Μέσω της πλακέτας επέκτασης η ακιδοσειρά εξέρχεται στο πάνω μέρος παραμένοντας προσιτή. Για την τροφοδοσία του μικροϋπολογιστή χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό με ακροδέκτη USB-C. Καθώς ήταν απαραίτητη και η επικοινωνία του συστήματος του πομπού με αυτό του δέκτη μέσω του διαδικτύου, ένα καλώδιο Ethernet συνδέθηκε στην αντίστοιχη υποδοχή του μικροϋπολογιστή. Τα σημεία τροφοδοσίας της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος με τα τρανζίστορ-διακόπτες, της πλακέτας των VCOs, καθώς και του ενισχυτή στο τελευταίο στάδιο πριν την κεραία, συνδέθηκαν μέσω καλωδίων στην ακιδοσειρά GPIO, σε διαθέσιμες ακίδες που προσφέρουν τάση 5 V, 3.3 V και γείωση. Στην πλακέτα των τρανζίστορ-διακοπών οι τρεις ακίδες εξόδου της τροφοδοσίας για κάθε έναν από τους τρεις VCOs, συνδέθηκαν μέσω καλωδίων στις αντίστοιχες ακίδες της πλακέτας που περιλαμβάνει τους VCOs. Όσο για τις ακίδες στα σημεία ελέγχου της κατάστασης των διακοπών, αυτές συνδέθηκαν μέσω καλωδίων με τις ακίδες GPIO16, για τον διακόπτη που ελέγχει την τροφοδοσία του CVCO55CC-1912-2114, GPIO20 για τον διακόπτη που ελέγχει την τροφοδοσία του HMC429LP4, και GPIO21 για τον διακόπτη που ελέγχει την τροφοδοσία του HMC358MS8G. Στην ακιδοσειρά GPIO που προεκτείνεται πάνω στην πλακέτα επέκτασης του μικροϋπολογιστή, οι ακίδες αυτές αναγράφονται αντίστοιχα ως P27, P28 και P29. Στην πλακέτα των VCO, τα σημεία A και B του διακόπτη RF, ο οποίος επιλέγει να οδηγήσει προς την κεραία είτε την έξοδο του CVCO55CC-1912-2114 είτε αυτήν του HMC429LP4, συνδέθηκαν για τον έλεγχο του διακόπτη στις ακίδες GPIO5 και GPIO6 αντίστοιχα. Αυτές αναγράφονται στην πλακέτα επέκτασης ως P21 και P22 αντίστοιχα. Για τον δεύτερο διακόπτη RF της πλακέτας, ο οποίος επιλέγει να οδηγήσει προς την κεραία είτε την έξοδο του HMC358MS8G είτε την έξοδο του πρώτου διακόπτη RF, τα σημεία ελέγχου A και B, συνδέθηκαν με τις ακίδες GPIO19 και GPIO26 αντίστοιχα. Στην πλακέτα επέκτασης αυτές αναγράφονται αντίστοιχα ως P24 και P25. Στην ίδια πλακέτα, ένα ακόμα καλώδιο χρησιμοποιήθηκε για να συνδέσει την ακίδα εισόδου της ρυθμιστικής τάσης (V_{tune}) για τους τρεις VCOs με την έξοδο του DAC, DAC8552, που βρίσκεται στην πλακέτα επέκτασης. Το καλώδιο αυτό βιδώθηκε σε ένα βύσμα της πλακέτας επέκτασης όπου προσφέρεται η έξοδος τάσης του καναλιού A του DAC, το οποίο αναγράφεται στην πλακέτα επέκτασης ως DAC0. Η τάση αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τον DAC ήταν 5V, η οποία ορίστηκε μέσω του κατάλληλου βραχυκυκλωτήρα πάνω στην πλακέτα επέκτασης. Η είσοδος σήματος του ενισχυτή, ZX60-83LN-S+, βιδώθηκε μέσω κατάλληλου βύσματος με την ομοαξονική υποδοχή SMA στην έξοδο της πλακέτας που περιέχει τους VCOs. Τέλος, η έξοδος του ενισχυτή συνδέθηκε μέσω κατάλληλου ομοαξονικού καλωδίου SMA με την κεραία χοάνης. Η τελική μορφή του υλοποιημένου, υπό δοκιμή συστήματος του πομπού φαίνεται στην φωτογραφία στο Σχήμα 3.30.



Σχήμα 3.30: Η τελική μορφή του υπό δοκιμή συστήματος του πομπού.

3.3.2 Το λογισμικό μέρος του συστήματος του πομπού

Εκτός από το σύνολο των υλικών μερών το σύστημα του πομπού περιλαμβάνει και το απαραίτητο λογισμικό για τον έλεγχο αυτών, καθώς και για να εκτελεί γενικά τις λειτουργίες που αντιστοιχούν σε αυτόν, στα πλαίσια της πειραματικής διάταξης πομπού-δέκτη. Για αυτόν τον σκοπό αναπτύχθηκε ο κατάλληλος κώδικας γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Ο συγκεκριμένος κώδικας εκτελείται και τρέχει συνεχώς από τον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi. Μέσω του κώδικα, ο πομπός διαβάζει μηνύματα που λαμβάνει από τον δέκτη κάθε δευτερόλεπτο. Από κάθε μήνυμα αποσπά την τιμή της συχνότητας στην οποία ο δέκτης ζητάει από τον πομπό να εκπέμψει. Έπειτα, ενεργοποιεί την τροφοδοσία του κατάλληλου VCO και εφαρμόζει στην είσοδό του την κατάλληλη ρυθμιστική τάση μέσω του DAC. Στη συνέχεια, ο πομπός στέλνει ένα μήνυμα στον δέκτη ενημερώνοντας τον πως η εκπομπή σήματος στην επιθυμητή συχνότητα έχει ξεκινήσει. Τέλος, ο πομπός αναμένει τη λήψη του επόμενου μηνύματος από τον δέκτη, για την εκπομπή σε νέα συχνότητα. Στο Σχήμα 3.31 ακολουθεί το διάγραμμα ροής με τα βασικά σημεία του κώδικα που εκτελείται στον πομπό.



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα ροής του κώδικα που τρέχει στον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi του συστήματος του πομπού.

Το πρώτο βήμα κατά την εκτέλεση του κώδικα του πομπού είναι η φόρτωση ενός επιπλέον αρχείου κώδικα, στο εσωτερικό του οποίου περιλαμβάνεται μια κλάση για τον DAC, DAC8552. Για τη συγκεκριμένη κλάση ορίστηκαν δύο συναρτήσεις. Η πρώτη αφορά την αρχικοποίηση της επικοινωνίας με τον DAC μέσω της διεπαφής SPI. Στο εσωτερικό της ορίζεται η ακίδα GPIO23 του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi ως η έξοδος του σήματος \overline{CS} για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της επικοινωνίας με τον DAC. Παράλληλα, στο εσωτερικό της ίδιας συνάρτησης ορίζεται για το SPI η λειτουργία 1 του Πίνακα Β.2 του Παραρτήματος Β, σύμφωνα με την οποία τα δεδομένα διαβάζονται σε κάθε καθοδικό παλμό του σήματος ρολογιού, SCLK, του SPI, για το οποίο ορίστηκε συχνότητα 20 kHz. Η δεύτερη συνάρτηση της κλάσης του DAC αφορά την αποστολή δεδομένων σε αυτόν μέσω του SPI, σύμφωνα με τη λογική που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.2.4. Για τη χρήση της διεπαφής SPI χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη `spidev`, η οποία περιλαμβάνεται με την εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος Raspberry Pi OS στον μικροϋπολογιστή.

Στον κύριο κώδικα, αφού φορτωθεί το αρχείο με την κλάση του DAC, φορτώνονται και κάποιες άλλες απαραίτητες βιβλιοθήκες, η `RPi.GPIO`, η `socket` και η `time`. Και οι τρεις αυτές βιβλιοθήκες είναι προ-εγκατεστημένες στο λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi OS. Η βιβλιοθήκη `RPi.GPIO` χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των προγραμματιζόμενων ακίδων GPIO. Μέσω αυτής μπορεί να οριστεί μια ακίδα GPIO ως είσοδος ή έξοδος, και να αναγνωστεί μια τιμή, αν οριστεί ως είσοδος, ή, αν οριστεί ως έξοδος, να τεθεί σε κατάσταση HIGH ή LOW. Η βιβλιοθήκη `time` χρησιμοποιείται στον κώδικα μόνο για την προσθήκη καθυστερήσεων όπου είναι απαραίτητο. Γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές ακόμα λειτουργίες ημερομηνίας και ώρας, μέτρησης χρονικής διάρκειας, αντίστροφης μέτρησης κλπ. Η βιβλιοθήκη `socket` χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός αντικειμένου `socket` με τη βοήθεια του οποίου καθίσταται δυνατή η επικοινωνία μεταξύ του πομπού και του δέκτη μέσω του διαδικτύου. Γενικά, ως `socket` ορίζεται ένα άκρο μιας ζεύξης μέσω της οποίας επικοινωνούν δύο εφαρμογές στο διαδίκτυο. Ένα `socket` δεσμεύει έναν μοναδικό αριθμό θύρας (`port number`), μέσω του οποίου μπορεί να αναγνωριστεί η εφαρμογή για την οποία προορίζονται τα δεδομένα από το μοντέλο TCP/IP (Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης/Πρωτόκολλο Διαδικτύου, Transmission Control Protocol/Internet Protocol) του διαδικτύου. Ένα `socket` σχηματίζεται από το ζεύγος του αριθμού θύρας και της διεύθυνσης IP που έχει στο διαδίκτυο η συσκευή στην οποία τρέχει η εφαρμογή.

Αφού φορτωθούν όλες οι βιβλιοθήκες, δηλώνονται κάποιες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται παρακάτω στον κώδικα. Στις μεταβλητές αυτές περιλαμβάνεται ο αριθμός θύρας που αργότερα χρησιμοποιείται για την κατασκευή του αντικειμένου `socket`, και οι αριθμοί των ακίδων GPIO που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κατάστασης των διακοπών-τρανζίστορ καθώς και των διακοπών RF. Οι αριθμοί αυτών των ακίδων GPIO, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι 16, 20 και 21 για τον έλεγχο των διακοπών-τρανζίστορ, και 5, 6, 19 και 26 για τον έλεγχο των διακοπών RF. Επίσης, σε μια μεταβλητή αποθηκεύονται οι τρεις τιμές της ρυθμιστικής τάσης (V_{tune}) που χρειάζονται οι τρεις VCOs για εκπομπή σήματος

στις συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Συγκεκριμένα, για εκπομπή σε συχνότητα 2.07 GHz από τον CVCO55CC-1912-2114, η αντίστοιχη ρυθμιστική τάση είναι 3.44 V, για εκπομπή σε συχνότητα 4.63GHz από τον HMC429LP4, η τάση αυτή είναι 1.837 V, ενώ για εκπομπή σε συχνότητα 6.22 GHz από τον HMC358MS8G, η ρυθμιστική τάση είναι 2.879 V. Οι τιμές αυτές προσδιορίστηκαν με ακρίβεια με τη βοήθεια ενός αναλυτή φάσματος, όπου καθώς μεταβάλλονταν η ρυθμιστική τάση για κάθε VCO παρατηρούνταν η συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος.

Αφού δηλωθούν και οι παραπάνω μεταβλητές, ορίζονται τρεις συναρτήσεις. Μια συνάρτηση ελέγχει κάθε 2 δευτερόλεπτα αν κάποιος client αναμένει να συνδεθεί με το σύστημα του πομπού μέσω του socket που κατασκευάζεται. Στην επικοινωνία αυτή, ο πομπός λειτουργεί ως server. Αν υπάρχει κάποιος client, ο πομπός αποδέχεται τη σύνδεση. Η δεύτερη συνάρτηση αναλαμβάνει την εκπομπή σήματος στην κατάλληλη συχνότητα μέσω του ορισμού της κατάλληλης κατάστασης σε κάθε διακόπτη και της κατάλληλης τιμής για την ρυθμιστική τάση. Η τρίτη συνάρτηση περιλαμβάνει τον βασικό κώδικα. Στο εσωτερικό της καλούνται οι δύο προαναφερθείσες συναρτήσεις την στιγμή που είναι απαραίτητη η εκτέλεση των λειτουργιών που αυτές επιτελούν.

Η εκτέλεση του κώδικα της κύριας συνάρτησης ξεκινάει με την ολοκλήρωση του ορισμού των απαραίτητων μεταβλητών και συναρτήσεων. Στη συνάρτηση αυτή, πρώτα γίνεται η αρχικοποίηση του DAC. Έπειτα, οι απαραίτητες ακίδες GPIO που ορίστηκαν προηγουμένως για τον έλεγχο όλων των διακοπών, τίθενται ως έξοδοι. Το αντικείμενο socket αρχικοποιείται αμέσως μετά, και ο πομπός περιμένει να συνδεθεί κάποιος client. Όταν γίνει προσπάθεια σύνδεσης από κάποιον client, ο πομπός την αποδέχεται και εμφανίζει τη διεύθυνση IP του client. Το επόμενο μέρος του κώδικα εκτελείται συνεχώς αν ο client που συνδέθηκε είναι το σύστημα του δέκτη και δεν έχει παρουσιαστεί κάποιος σφάλμα. Αρχικά, ο πομπός διαβάζει έως 1024 bytes από το socket. Αν δεν υπάρχουν bytes από κάποιο μήνυμα ο πομπός κλείνει τη σύνδεση με τον client και η εκτέλεση επιστρέφει στο προηγούμενο βήμα, όπου ο πομπός περιμένει να συνδεθεί κάποιος client. Αν ωστόσο βρεθούν bytes κάποιου μηνύματος στο socket, τότε ο πομπός ελέγχει αν το μήνυμα αυτό ξεκινά με τη φράση "Transmit on Frequency". Τα μηνύματα που αποστέλλονται από τον δέκτη στον πομπό έχουν πάντα την ίδια μορφή και μέγεθος 42 bytes. Το μόνο μεταβλητό μέρος του μηνύματος είναι η συχνότητα εκπομπής η οποία αναφέρεται αμέσως μετά από την παραπάνω φράση, ως "freq_2", "freq_4" ή "freq_6", για συχνότητα 2.07 GHz, 4.63 GHz και 6.22 GHz αντίστοιχα. Έτσι, ο πομπός ελέγχει αν το μήνυμα που έλαβε έχει την αναμενόμενη μορφή, και αν αυτό ισχύει, τότε αποσπά την πληροφορία της συχνότητας από το μήνυμα. Αν το μήνυμα δεν έχει την αναμενόμενη μορφή, ο πομπός ενημερώνει για αυτό με την εμφάνιση ενός μηνύματος, και στη συνέχεια τερματίζει ξανά τη σύνδεση και επιστρέφει στο βήμα όπου περιμένει για τη σύνδεση κάποιου client. Εάν το μήνυμα ήταν το αναμενόμενο και ο πομπός απέσπασε την πληροφορία της συχνότητας από αυτό, στη συνέχεια καλείται η συνάρτηση που αναλαμβάνει την εκπομπή σήματος της συγκεκριμένης συχνότητας. Όλοι οι VCOs απενεργοποιούνται μέσω

των ακίδων GPIO που ελέγχουν τους διακόπτες-τρανζίστορ, οι οποίοι με τη σειρά τους ελέγχουν την τροφοδοσία του κάθε VCO. Στη συνέχεια, ανάλογα με την τιμή της συχνότητας που βρέθηκε στο μήνυμα που έστειλε ο δέκτης, μέσω των ακίδων GPIO ορίζεται η κατάλληλη κατάσταση των διακοπών RF, έτσι ώστε να οδηγηθεί προς την κεραία η έξοδος εκείνου του VCO ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εκπομπή σήματος στην εκάστοτε επιθυμητή συχνότητα. Αμέσως μετά ενεργοποιείται ο κατάλληλος διακόπτης-τρανζίστορ και τελικά ο συγκεκριμένος VCO. Στο επόμενο βήμα, ο DAC ρυθμίζεται κατάλληλα μέσω της διεπαφής SPI, έτσι ώστε να παρέχει στην έξοδό του την τιμή ρυθμιστικής τάσης την οποία χρειάζεται ο VCO για την εκπομπή σήματος στην επιθυμητή συχνότητα. Σε αυτό το σημείο το σύστημα του πομπού εκπέμπει πλέον στη συχνότητα που ζήτησε μέσω του μηνυμάτος του ο δέκτης. Τέλος, με την εκπομπή στη συχνότητα αυτή να είναι ενεργή, ο πομπός στέλνει ένα μήνυμα σαν απάντηση στον δέκτη, με τη φράση “Transmitting on Frequency”, ακολουθούμενη από την τιμή της συχνότητας με τη μορφή “freq_2”, “freq_4” ή “freq_6”, όπως και στο μήνυμα που έλαβε. Τέλος, η εκτέλεση του κώδικα επιστρέφει στο σημείο όπου γίνεται η ανάγνωση ενός μηνύματος από το socket. Το επόμενο μήνυμα διαβάζεται, με τον πομπό να αποσπά την πληροφορία για εκπομπή σε μια νέα συχνότητα, και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς.

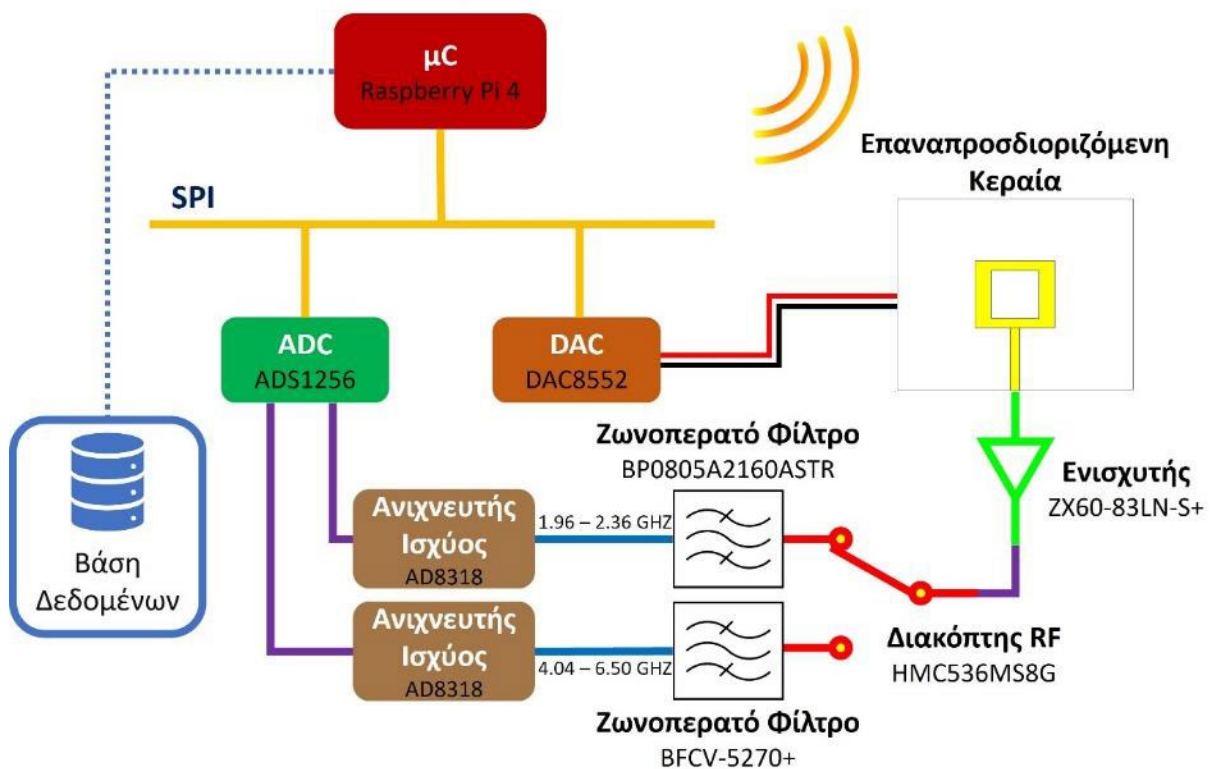
Για τη ρύθμιση του DAC ώστε να προσφέρει στην έξοδό του την κατάλληλη ρυθμιστική τάση στον κάθε VCO πρέπει να αποσταλούν συγκεκριμένα δεδομένα σε αυτόν μέσω της διεπαφής SPI. Καθώς στο σύστημα του πομπού η τάση αναφοράς (V_{REF}) του DAC ορίστηκε με 5 V, μέσω του κατάλληλου βραχυκυκλωτήρα της πλακέτας επέκτασης High-Precision AD/DA Board, τα δεδομένα αυτά υπολογίζονται στον κώδικα του πομπού μέσω της εξίσωσης (3.1), αν αυτή πάρει τη μορφή:

$$D = 5 \times \frac{V_{OUT}}{65536}, \quad (3.3)$$

όπου D είναι τα δεδομένα με τη μορφή ενός δεκαδικού αριθμού, και V_{OUT} είναι η τάση που προσφέρει στην έξοδό του ο DAC, και επομένως η ρυθμιστική τάση που φτάνει στην είσοδο κάθε VCO. Το Raspberry Pi 4 διαθέτει δύο διεπαφές SPI. Μέσω της πλακέτας επέκτασης ο DAC συνδέεται στη διεπαφή που συνήθως αναφέρεται ως SPI0 στο Raspberry Pi 4. Στη διεπαφή SPI0, η ακίδα GPIO10 χρησιμοποιείται ως η γραμμή MOSI, δηλαδή η γραμμή από την οποία ο DAC διαβάζει τα δεδομένα. Όσο για το σήμα ρολογιού, SCLK, στη συγκεκριμένη διεπαφή αντιστοιχεί στην ακίδα GPIO11. Όπως αναφέρθηκε ήδη, για τη γραμμή \overline{CS} του SPI μέσω της οποίας σηματοδοτείται η έναρξη ή ο τερματισμός της επικοινωνίας με τον DAC, χρησιμοποιήθηκε η ακίδα GPIO23. Η ακίδα αυτή συνδέεται με τον DAC πάνω στην πλακέτα επέκτασης. Επίσης, δεν αποτελεί μέρος της διεπαφής SPI0, αλλά και στις δύο διεπαφές SPI του Raspberry Pi 4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε προγραμματιζόμενη ακίδα GPIO για το σήμα \overline{CS} .

3.4 Υλοποίηση του συστήματος του δέκτη

Το δεύτερο βασικό σύστημα που περιλαμβάνει η εξειδικευμένη πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε, είναι το σύστημα του δέκτη. Ο δέκτης ήταν υπεύθυνος για τη λήψη του σήματος που εξέπεμπε ο πομπός σε συχνότητα 2.07, 4.63 ή 6.22 GHz, για τη μέτρηση της ισχύος του, καθώς και για την καταγραφή της τιμής της ισχύος του σήματος για κάθε μια από τις τρεις αυτές συχνότητες. Οι συχνότητες αυτές επιλέχθηκαν επειδή αποτελούν βασικούς συντονισμούς της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε. Γενικά, με τη χρήση κατάλληλης κάθε φορά κεραίας, ο δέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ισχύος σημάτων συχνότητας από 1.96 έως 2.36 GHz και από 4.04 έως 6.5 GHz. Το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος του δέκτη ακολουθεί στο Σχήμα 3.32.



Σχήμα 3.32: Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος του δέκτη.

Όπως στο σύστημα του πομπού, έτσι και σε αυτό του δέκτη, η λειτουργία του ελέγχεται συνολικά από έναν μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 4 Model B. Αρχικά, ο δέκτης αποστέλλει ένα μήνυμα στον πομπό, όπου αναφέρει τη συχνότητα στην οποία επιθυμεί να λάβει κάποιο σήμα ώστε τελικά να μετρήσει την ισχύ του. Ο δέκτης ζητάει από τον πομπό την εκπομπή σήματος σε μια από τρεις πιθανές συχνότητες: 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Στη συνέχεια, αναμένει ένα μήνυμα απάντησης από τον πομπό μέσω του οποίου επιβεβαιώνεται πως αυτός έχει ξεκινήσει την εκπομπή σήματος στην επιθυμητή συχνότητα. Μόλις ο δέκτης λάβει αυτό το μήνυμα ξεκινάει τη διαδικασία μέτρησης και καταγραφής της ισχύος του. Το σήμα

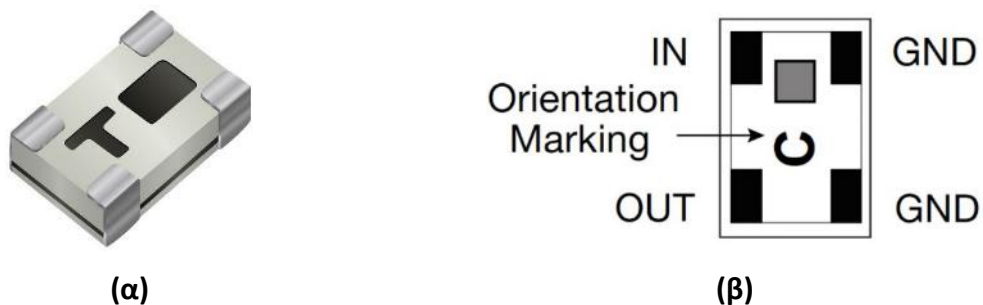
λαμβάνεται από μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία μικροταινίας, η οποία εμφανίζει τρεις βασικούς συντονισμούς σε συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Η λειτουργία της κεραίας σε κάθε συντονισμό βελτιστοποιείται με την εφαρμογή μιας τάσης στα άκρα μιας διόδου στο πίσω μέρος της. Καθώς ο δέκτης γνωρίζει τη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος, παρέχει στην κεραία την κατάλληλη τάση για τη βελτιστοποίηση του αντίστοιχου συντονισμού της. Η τάση αυτή προέρχεται από έναν DAC, τον DAC8552, ο οποίος βρίσκεται στην πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi. Η τάση στην έξοδο του DAC καθορίζεται από ένα μήνυμα ελέγχου που στέλνει σε αυτόν το Raspberry Pi μέσω της διεπαφής SPI που διαθέτει. Το σήμα που εκπέμπει ο πομπός λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη και εισέρχεται σε έναν ενισχυτή από όπου εξέρχεται ενισχυμένο και καταλήγει σε έναν διακόπτη RF. Ο διακόπτης RF ελέγχεται μέσω ακίδων GPIO του Raspberry Pi, και μέσα από αυτόν το σήμα οδηγείται σε ένα από δύο πιθανά ζωνοπερατά φίλτρα, για την εξάλειψη πιθανών παρεμβολών. Το ένα φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων στο εύρος από 1.96 έως 2.36 GHz, ενώ το άλλο επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων στο εύρος από 4.04 έως 6.5 GHz. Έτσι, ανάλογα με την τιμή της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος, το Raspberry Pi επιλέγει μέσω του διακόπτη RF το κατάλληλο φίλτρο. Έπειτα, το σήμα οδηγείται σε έναν ανιχνευτή ισχύος ο οποίος βρίσκεται στην έξοδο κάθε φίλτρου. Ο ανιχνευτής ισχύος παράγει μια τάση η τιμή της οποίας εξαρτάται από την ισχύ του σήματος στην είσοδό του. Η σχέση αυτή είναι γραμμική και γνωστή στο Raspberry Pi. Για τη μέτρηση της τάσης στην έξοδο του ανιχνευτή ισχύος χρησιμοποιείται ένας ADC, ο ADS1256, που βρίσκεται στην πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board. Η τάση εισέρχεται σε ένα από τα κανάλια του ADC και κωδικοποιείται σε δυαδική μορφή. Μέσω της διεπαφής SPI το Raspberry Pi διαβάζει την κωδικοποιημένη τιμή της τάσης, υπολογίζει την πραγματική τιμή της και τελικά μέσω αυτής υπολογίζει την τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Η τιμή αυτή της ισχύος αποθηκεύεται τοπικά σε ένα αρχείο κειμένου μαζί με την ώρα της μέτρησης. Το όνομα του αρχείου ορίζεται ως η ημερομηνία των μετρήσεων. Επομένως, κάθε μέρα δημιουργείται και ένα καινούριο αρχείο δεδομένων. Επιπρόσθετα της τοπικής καταγραφής των μετρήσεων ισχύος, αυτές αποθηκεύονται και σε μια απομακρυσμένη βάση δεδομένων η οποία έχει εγκατασταθεί σε έναν σταθερό υπολογιστή. Στη βάση δεδομένων οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε τρεις πίνακες, κάθε ένας εκ των οποίων αφορά μια συγκεκριμένη από τις τρεις συχνότητες. Τέλος, με την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος να έχει καταγραφεί, ο δέκτης αποστέλλει ένα νέο μήνυμα στον πομπό ζητώντας του να ξεκινήσει την εκπομπή στην επόμενη συχνότητα. Έπειτα, αναμένει την απάντηση του πομπού και όλη η διαδικασία που αναφέρθηκε επαναλαμβάνεται συνεχώς. Ο δέκτης ζητάει την εκπομπή σε νέα συχνότητα κάθε περίπου 1 δευτερόλεπτο, επομένως για κάθε μια συχνότητα μετριέται η ισχύς του σήματος κάθε 3 περίπου δευτερόλεπτα.

3.4.1 Το υλικό μέρος του συστήματος του δέκτη

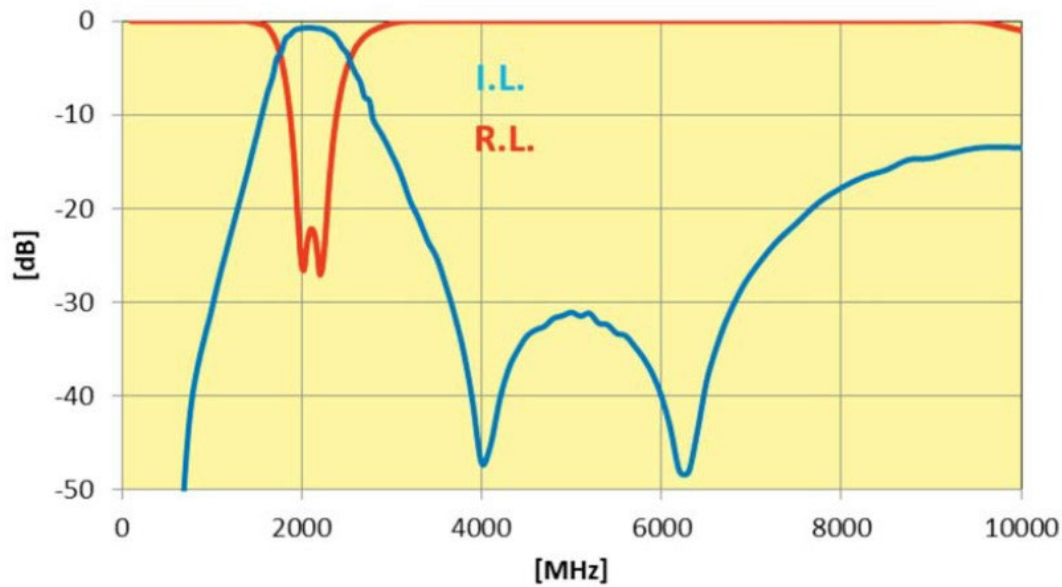
Στην ενότητα αυτή, περιγράφονται τα διάφορα υλικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται το σύστημα του δέκτη, με εξαίρεση την πλακέτα επέκτασης High-Precision AD/DA Board του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi, η οποία περιλαμβάνει τον ADC και τον DAC, ADS1256 και DAC8552 αντίστοιχα. Η πλακέτα αυτή έχει περιγραφεί στην Ενότητα 3.2.4. Επίσης, από την παρούσα ενότητα έχουν εξαιρεθεί και ο ενισχυτής, ZX60-83LN-S+, καθώς και ο διακόπτης RF, HMC536MS8G, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν και στο σύστημα του πομπού και περιγράφηκαν στην Ενότητα 3.3.1. Η επαναπροσδιοριζόμενη κεραία που υλοποιήθηκε για το σύστημα του δέκτη περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Έτσι, στην ενότητα αυτή περιγράφονται συγκεκριμένα τα δύο ζωνοπερατά φίλτρα, ο ανιχνευτής ισχύος και μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) που περιέχει αυτά, καθώς και τον διακόπτη RF. Επιπλέον, στο τέλος αυτής της ενότητας περιγράφεται και η διασύνδεση όλων των υλικών μερών του συστήματος του δέκτη.

Το ζωνοπερατό φίλτρο BP0805A2160ASTR

Ένα από τα δύο φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα του δέκτη για την αποκοπή τυχόν παρεμβολών είναι το BP0805A2160ASTR. Πρόκειται για ένα ζωνοπερατό φίλτρο της εταιρείας KYOCERA AVX, με τη μορφή συσκευής επιφανειακής τοποθέτησης (SMD, Surface-Mount Device). Η ζώνη διέλευσης του φίλτρου καλύπτει την περιοχή συχνοτήτων από 1960 έως 2360 MHz. Η εμπέδηση τόσο της εισόδου όσο και της εξόδου του φίλτρου είναι 50 Ω και η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς σήματος είναι 5 W. Στη ζώνη διέλευσης του φίλτρου η απώλειες λόγω της εισόδου του σήματος σε αυτό (IL, Insertion Loss) δεν ξεπερνούν την τιμή των 0.85 dB για την κεντρική συχνότητα 2160 MHz. Για συχνότητες εκτός της ζώνης διέλευσης η εξασθένηση του σήματος φτάνει έως 59 dB. Οι υποστηριζόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας του φίλτρου είναι από -40°C έως +85°C. Στο Σχήμα 3.33 φαίνεται μια γενική φωτογραφία του φίλτρου, καθώς και ένα διάγραμμα της εισόδου (IN), της εξόδου (OUT) και δύο σημείων γείωσης (GND) που διαθέτει. Έπειτα, στο Σχήμα 3.34, ακολουθεί μια γραφική απεικόνιση των απωλειών λόγω ανακλάσεων στην είσοδο του φίλτρου (RL, Return Loss), καθώς και των απωλειών λόγω της διέλευσης του σήματος από το φίλτρο (IL), ως προς τη συχνότητα [129].



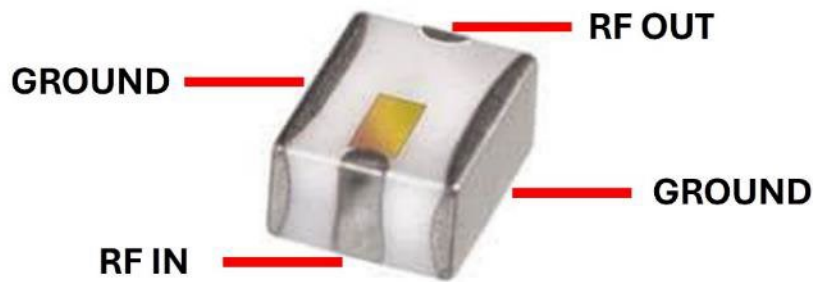
Σχήμα 3.33: (α) Γενική φωτογραφία του ζωνοπερατού φίλτρου BP0805A2160ASTR και (β) διάγραμμα με την είσοδο (IN), την έξοδο (OUT) και τα σημεία γείωσής του (GND).



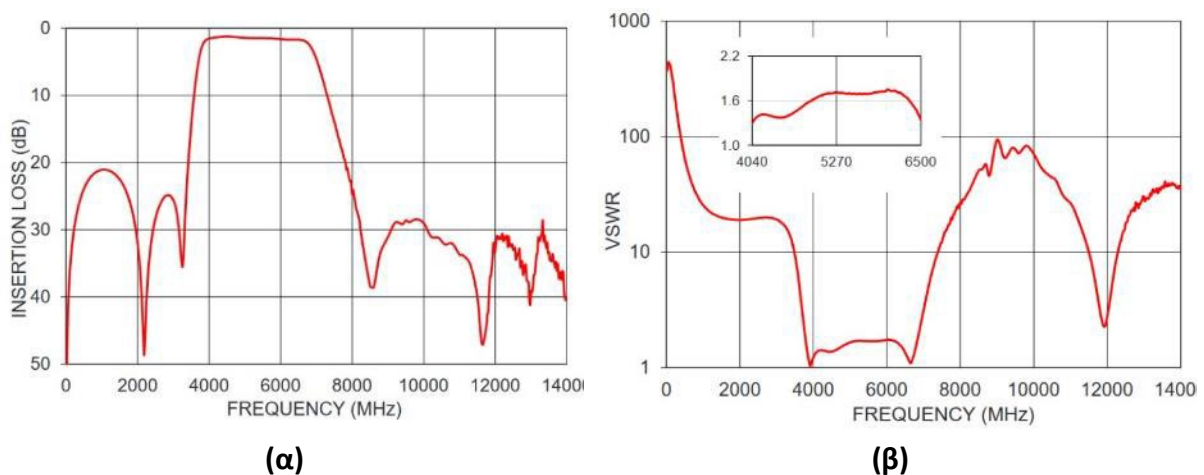
Σχήμα 3.34: Γραφική απεικόνιση των απωλειών (κάθετος άξονας) λόγω ανακλάσεων στην είσοδο του φίλτρου (RL, πορτοκαλί χρώμα) BP0805A2160ASTR, καθώς και εκείνων λόγω της διέλευσης του σήματος από το φίλτρο (IL, μπλε χρώμα), ως προς τη συχνότητα (οριζόντιος άξονας).

Το ζωνοπερατό φίλτρο BFCV-5270+

Το δεύτερο ζωνοπερατό φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα του δέκτη είναι το BFCV-5270+ της εταιρείας Mini Circuits, το οποίο έχει και αυτό μορφή SMD. Η ζώνη διέλευσης του συγκεκριμένου φίλτρου περιλαμβάνει τις συχνότητες από 4040 έως 6500 MHz. Η εμπέδηση στην είσοδο αλλά και στην έξοδο του φίλτρου είναι 50 Ω και η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς σήματος είναι 6 W. Στη ζώνη διέλευσης του φίλτρου οι απώλειες λόγω της διέλευσης ενός σήματος μέσα από αυτό (IL) δεν ξεπερνούν την τιμή των 4 dB, ενώ η τυπική τιμή είναι 1.5 dB. Επίσης, ο λόγος στάσιμου κύματος (VSWR), ισούται τυπικά με 2.3, που αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό απωλειών σήματος λόγω ανακλάσεων κατά την είσοδο στο φίλτρο ίσο με 15.5%. Στην περιοχή των συχνοτήτων για τις οποίες χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο στη διατριβή, δηλαδή 4.63 και 6.22 GHz, το VSWR δεν ξεπερνάει την τιμή 1.7, δηλαδή περίπου 6.7% του σήματος ανακλάται, ενώ το IL δεν ξεπερνά την τιμή των 1.7 dB. Για σήματα συχνοτήτων εκτός της ζώνης διέλευσης, οι απώλειες IL είναι τουλάχιστον 20 dB και το VSWR είναι τυπικά περίπου 20 (81.87% του σήματος ανακλάται). Το φίλτρο μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες από -55°C έως +100°C. Στο Σχήμα 3.35 απεικονίζεται μια γενική φωτογραφία του φίλτρου με σημειωμένες την είσοδο (RF IN), την έξοδο (RF OUT) και τα σημεία γείωσης (GROUND), ενώ στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.36, φαίνεται μια γραφική απεικόνιση του IL και του VSWR ως προς τη συχνότητα [130].



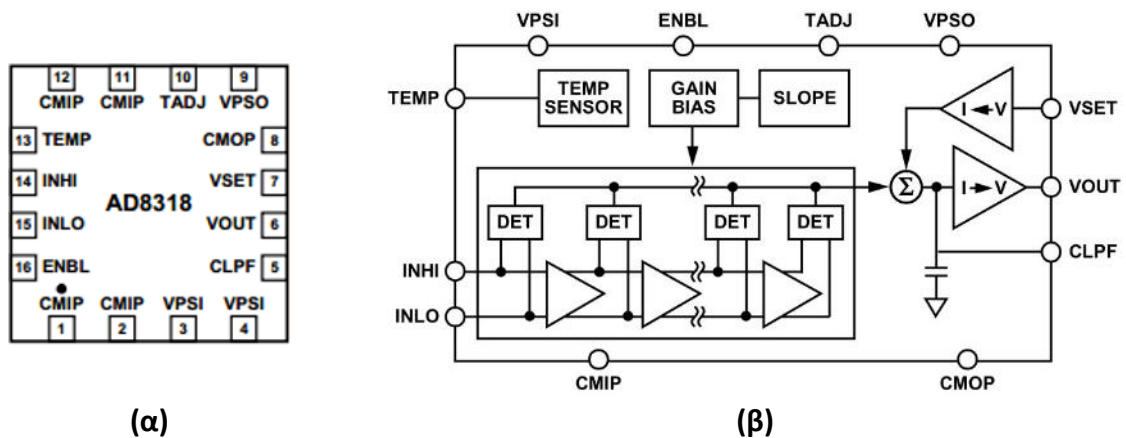
Σχήμα 3.35: Γενική φωτογραφία του ζωνοπερατού φίλτρου BFCV-5270+ και των σημείων εισόδου (RF IN), καθώς και εξόδου (RF OUT) σήματος και γείωσης (GROUND).



Σχήμα 3.36: Γραφική απεικόνιση **(α)** των απωλειών λόγω της διέλευσης ενός σήματος από το φίλτρο (Insertion Loss) και **(β)** του λόγου στάσιμου κύματος (VSWR), ως προς τη συχνότητα (Frequency) για το ζωνοπερατό φίλτρο BFCV-5270+.

Ο ανιχνευτής ισχύος AD8318

Για την ανίχνευση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από το σύστημα του δέκτη χρησιμοποιήθηκε ένας ανιχνευτής ισχύος υψηλής ακρίβειας, ο AD8318, της εταιρείας Analog Devices. Ο ανιχνευτής αυτός μπορεί λαμβάνει σήματα στο εύρος συχνοτήτων από 1 MHz έως 8 GHz, και ανάλογα με την τιμή του εισερχόμενου σήματος παράγει μια τάση. Η σχέση μεταξύ της ισχύος σήματος στην είσοδο και της τάσης στην έξοδο του AD8318 είναι γραμμική στην κλίμακα dB. Η συσκευή τροφοδοτείται με τάση 5 V στην οποία έχει και κατανάλωση ρεύματος 68 mA. Μέσω μιας λειτουργίας απενεργοποίησης που διαθέτει, η κατανάλωση μπορεί να πέσει σε τιμές κάτω από 1.5 mW. Οι υποστηριζόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας του ανιχνευτή ισχύος είναι από -40°C έως $+85^{\circ}\text{C}$. Στο Σχήμα 3.37 απεικονίζεται το διάγραμμα των εισόδων και εξόδων του AD8318, καθώς και ένα γενικό σχηματικό διάγραμμά της λειτουργίας του.



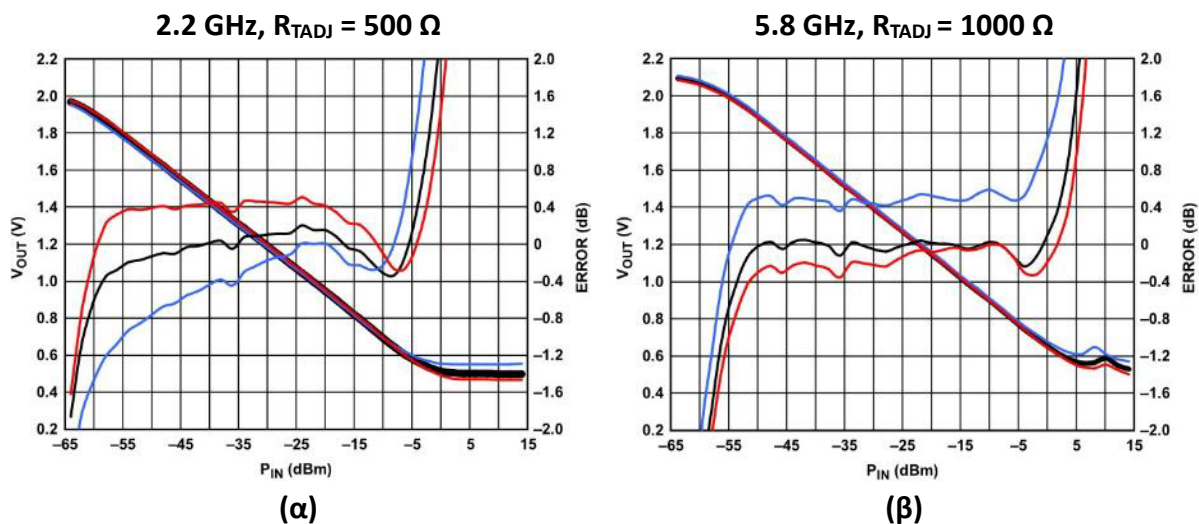
Σχήμα 3.37: (α) Διάγραμμα των εισόδων και εξόδων, και (β) σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του ανιχνευτή ισχύος AD8318.

Το λαμβανόμενο σήμα εισέρχεται στον AD8318 μέσω της εισόδου INHI. Έπειτα, στο εσωτερικό του AD8318, το σήμα διέρχεται από εννέα συνολικά στάδια ενίσχυσης, με την απολαβή τάσης καθενός από αυτά να είναι ίση με 8.7 dB. Ακριβώς πριν το πρώτο στάδιο ενίσχυσης, καθώς και στην έξοδο αυτού και όλων των επόμενων σταδίων, χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής που πραγματοποιεί ανόρθωση του σήματος. Από το σήμα τάσης προκύπτει ένα μεταβαλλόμενο σήμα ρεύματος, η μέση τιμή του οποίου αυξάνεται με την αύξηση του επιπέδου του αρχικού σήματος. Στη συνέχεια, καθώς οι ανιχνευτές αυτοί συνδέονται παράλληλα, όλα τα σήματα ρεύματος που προκύπτουν αθροίζονται μεταξύ τους. Το τελικό σήμα ρεύματος που προκύπτει από αυτήν την άθροιση μετατρέπεται τελικά και πάλι σε σήμα τάσης, το οποίο καταλήγει στην έξοδο, VOUT, του AD8318. Το σήμα στην έξοδο μπορεί να φιλτραριστεί με έναν πυκνωτή στο άκρο CLPF του ανιχνευτή ισχύος, ωστόσο, για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού χρόνου απόκρισης, θα πρέπει το σημείο αυτό να μείνει ασύνδετο. Ο ελάχιστος δυνατός χρόνος απόκρισης είναι 10 ns ανά μετατροπή ισχύος σε τάση. Ο AD8318 προσφέρει επιπλέον ένα σήμα στην έξοδο του TEMP, το οποίο προέρχεται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας. Επίσης, γειώνοντας μέσω μιας αντίστασης το σημείο TADJ μπορούν να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις που ίσως να προκύπτουν λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας. Μέσω της αντίστασης αυτής ρυθμίζεται ένα εσωτερικό ρεύμα και κατ' επέκταση η τάση στην έξοδο της συσκευής. Η συγκεκριμένη αντίσταση είναι επομένως κρίσιμη καθώς επηρεάζει τη σχέση μεταξύ της ισχύος του σήματος στην είσοδο του ανιχνευτή και της τάσης στην έξοδό του. Στον Πίνακα 3.4 περιλαμβάνονται κάποιες προτεινόμενες, σύμφωνα με τα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών, τιμές αντίστασης για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του AD8318 σε έξι επιλεγμένες συχνότητες. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.38 φαίνεται η λογαριθμική σχέση μεταξύ της λαμβανόμενης τάσης στην έξοδο του AD8318 και της ισχύος του σήματος στην είσοδο της συσκευής, για την περιοχή γύρω από τις συχνότητες των 2.2 και 5.8 GHz, καθώς και με αντίσταση στο σημείο TADJ ίση με 500 Ω και 1 kΩ

αντίστοιχα. Στα σχήματα αυτά φαίνεται και η μεταβολή του σφάλματος κατά τη μετατροπή της ισχύος του σήματος σε τάση.

Πίνακας 3.3: Προτεινόμενες τιμές της αντίστασης R_{TADJ} , μέσω της οποίας γειώνεται το σημείο TADJ του AD8318, για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της συσκευής στην περιοχή συγκεκριμένων συχνοτήτων.

Συχνότητα	Προτεινόμενη Αντίσταση R_{TADJ}
900 MHz	500 Ω
1.9 GHz	500 Ω
2.2 GHz	500 Ω
3.6 GHz	51 Ω
5.8 GHz	1 k Ω
8 GHz	500 Ω



Σχήμα 3.38: Γραφική αναπαράσταση της εξάρτησης μεταξύ της ισχύος του σήματος στην είσοδο και της τάσης στην έξοδο του AD8318, καθώς και της μεταβολής του σφάλματος, για συχνότητα **(α)** 2.2 GHz και **(β)** 5.8GHz, με την τιμή της αντίστασης R_{TADJ} να είναι 500 και 1000 Ω αντίστοιχα. Οι κόκκινες, μαύρες και μπλε καμπύλες αφορούν αντίστοιχα θερμοκρασία λειτουργίας +85°C, +25°C και -40°C.

Στη λειτουργία κατά την οποία ο AD8318 χρησιμοποιείται για μετρήσεις ισχύος σήματος, η τάση στην έξοδο της συσκευής (V_{OUT}) ή ένα μέρος αυτής, πρέπει να οδηγηθεί στο σημείο VSET, μέσω του οποίου επιστρέφει στη συσκευή. Στο Σχήμα 3.38, η κλήση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης μεταξύ τάσης εξόδου και ισχύος εισόδου μπορεί να μεταβληθεί με τη μεταβολή του ποσοστού της επιστρεφόμενης τάσης. Στα πλαίσια της διατριβής διατηρήθηκε η τυπική κλήση του AD8318, με την απευθείας εφαρμογή της τάσης εξόδου σε αυτό το σημείο. Η εξίσωση του ευθύγραμμου τμήματος της σχέσης μεταξύ της τάσης στην έξοδο (V_{OUT}) και της ισχύος στην είσοδο (P_{IN}) του AD8318 είναι:

$$V_{OUT} = -0.024P_{IN} + 0.478 , \quad (3.4)$$

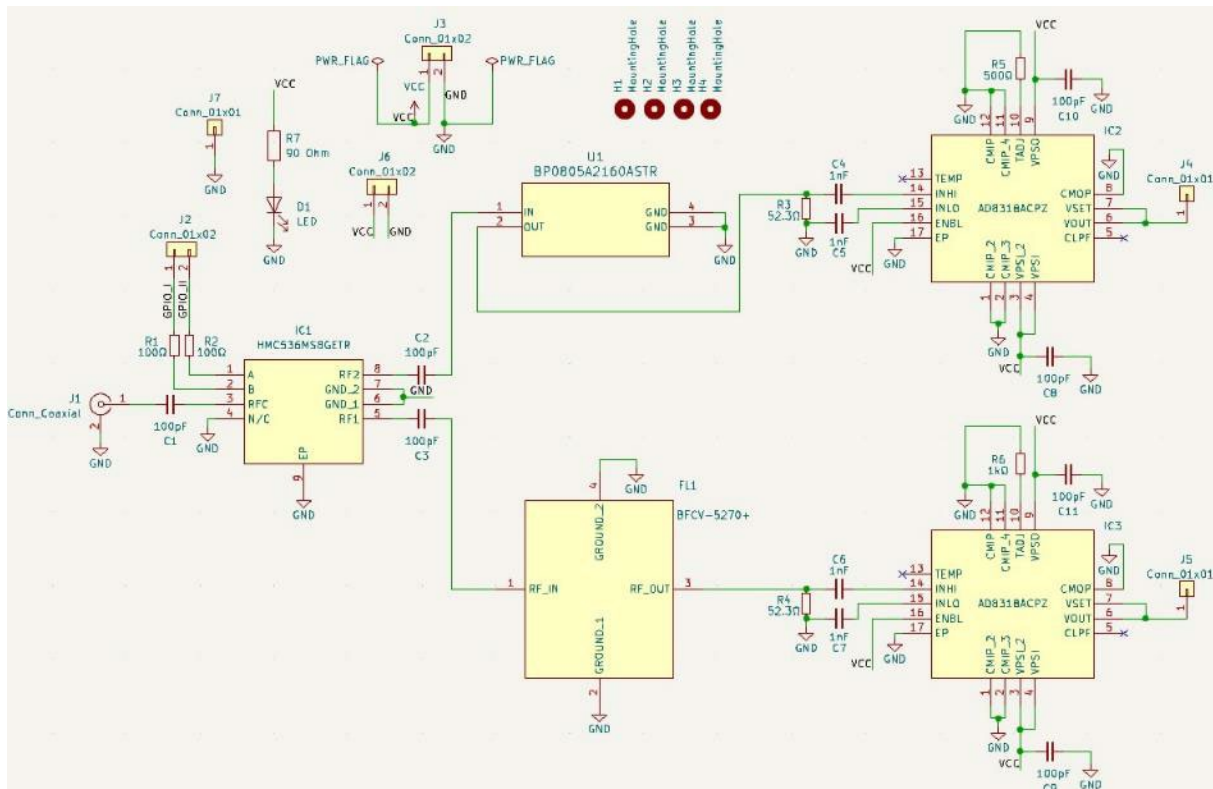
για την καμπύλη των 2.2 GHz, ενώ για εκείνη των 5.8 GHz η αντίστοιχη εξίσωση είναι:

$$V_{OUT} = -0.025P_{IN} \pm 0.625 . \quad (3.5)$$

Επιπρόσθετα της λειτουργίας μέτρησης, ο AD8318, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε λειτουργία ελεγκτή. Κατά τη συγκεκριμένη λειτουργία η έξοδος VOUT χρησιμοποιείται για τον έλεγχο άλλων συσκευών, όπως για παράδειγμα ενισχυτών μεταβλητού κέρδους (VGA, Variable Gain Amplifier) ή μεταβλητών εξασθενητών τάσης (VVA, Variable Voltage Attenuator). Αυτήν τη φορά δεν υπάρχει ανατροφοδότηση με την επιστροφή της τάσης εξόδου μέσω του VSET. Στο VSET εφαρμόζεται μια τάση ελέγχου. Η έξοδος VOUT συνδέεται στο σημείο του VGA από όπου ρυθμίζεται η ενίσχυσή του, και μεταβάλλεται ώσπου η ισχύς του ενισχυμένου από τον VGA σήματος να ταυτίζεται με την ισχύ που θα είχε ένα λαμβανόμενο από τον AD8318 σήμα στη λειτουργία μέτρησης, το οποίο θα αντιστοιχούσε σε έξοδο VOUT ίση με το VSET, σύμφωνα με την εκάστοτε λογαριθμική σχέση. Στη λειτουργία αυτή ρυθμίζεται, επομένως, μέσω της εφαρμογής τάσης στο VSET, η ισχύς του σήματος στην έξοδο του VGA. Στο σύστημα του δέκτη της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε μόνο η λειτουργία μέτρησης [131].

Υλοποίηση πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος για την ανίχνευση της ισχύος σήματος

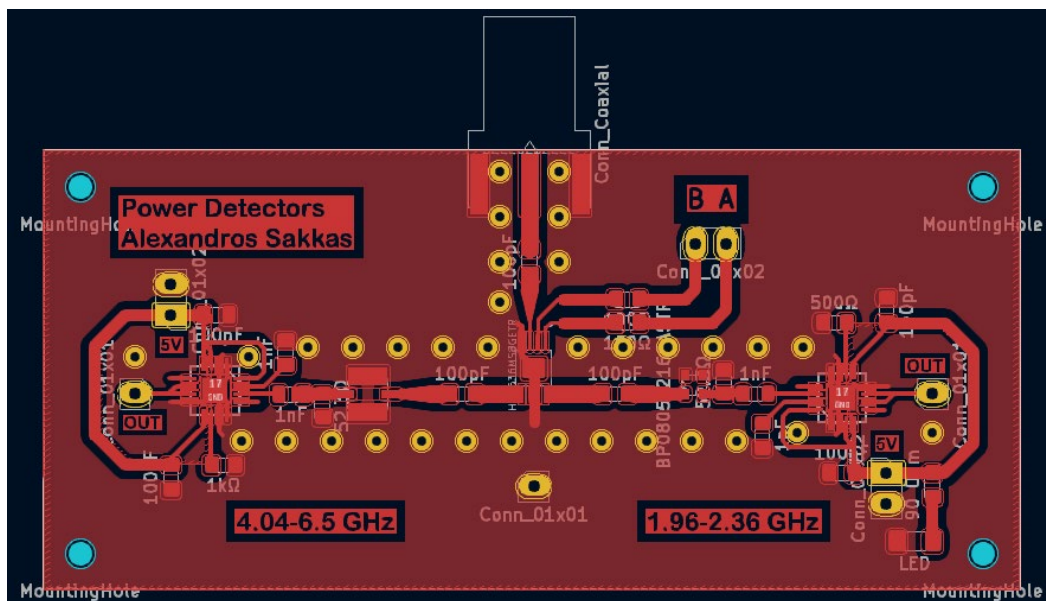
Για την ανίχνευση και αργότερα τη μέτρηση της ισχύος σήματος από το σύστημα του δέκτη σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος. Η πλακέτα σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad. Περιλαμβάνει έναν διακόπτη RF, τον HMC536MS8G, τα δύο ζωνοπερατά φίλτρα BP0805A2160ASTR και BFCV-5270+, καθώς και δύο ανιχνευτές ισχύος AD8318. Το σήμα που εισέρχεται στην είσοδο της πλακέτας οδηγείται στον διακόπτη RF και ανάλογα με την κατάστασή του μεταφέρεται σε ένα από τα δύο φίλτρα, με ζώνη διέλευσης είτε 1.96 έως 2.36 GHz είτε 4.04 έως 6.50 GHz. Στην έξοδο του κάθε φίλτρου βρίσκεται από ένας ανιχνευτής ισχύος AD8318. Αφού το σήμα μετατραπεί σε τάση, μέσω της πλακέτας προσφέρεται για μέτρηση σε κάποιες ακίδες. Για τον έλεγχο της κατάστασης του διακόπτη RF, και επομένως της κατεύθυνσης του σήματος από τον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi, η πλακέτα διαθέτει επιπρόσθετες ακίδες. Το ίδιο ισχύει και για την τροφοδοσία 5 V και τις γειώσεις που απαιτούνται για τους ανιχνευτές ισχύος. Καθώς ο ανιχνευτής ισχύος μπορεί να ανιχνεύσει την ισχύ σημάτων συχνότητας από 1 MHz έως 8 GHz και καθώς χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω ζωνοπερατά φίλτρα, με τη προσαρμογή της κατάλληλης κεραίας στην είσοδο της πλακέτας μπορεί μέσω αυτής να μετρηθεί η ισχύς σημάτων κάθε συχνότητας στο εσωτερικό της ζώνης διέλευσης των δύο φίλτρων. Επομένως, η πλακέτα των AD8318 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ισχύος σημάτων συχνοτήτων από 1.96 έως 2.36 GHz, καθώς και από 4.04 έως 6.50 GHz. Το συνολικό σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας περιλαμβάνεται στη συνέχεια στο Σχήμα 3.39. Το κύκλωμα σχεδιάστηκε στον Schematic Editor του KiCad.



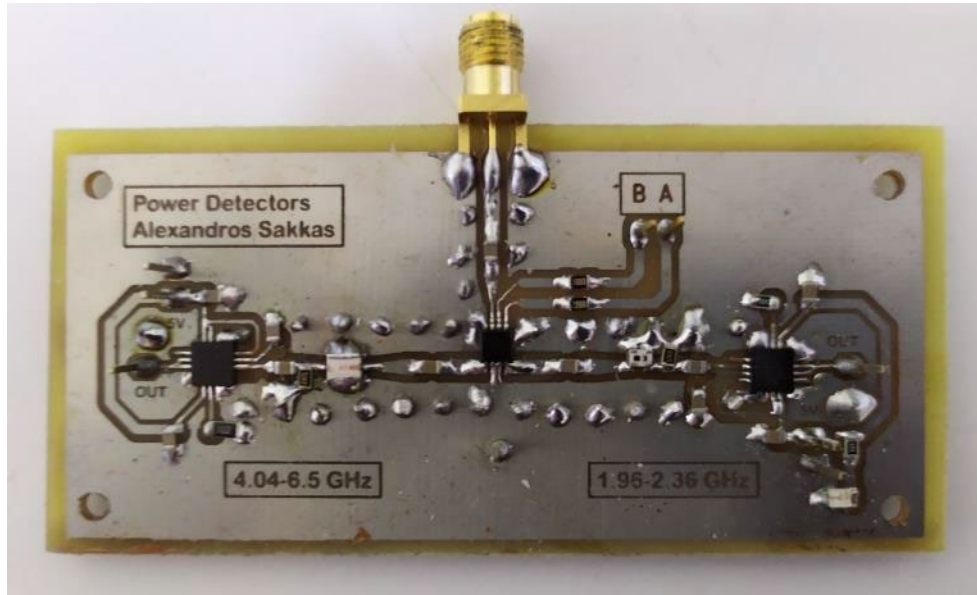
Σχήμα 3.39: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας ανίχνευσης της ισχύος σήματος όπως σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο KiCad.

Σύμφωνα με το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας, το σήμα εισέρχεται από το σημείο J1, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα ομοαξονικό βύσμα SMA εμπέδησης 50 Ω. Αμέσως μετά, το σήμα οδηγείται στον διακόπτη RF, HMC536MS8G. Στην είσοδο και στις εξόδους του διακόπτη έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές χωρητικότητας 100 pF. Σκοπός των πυκνωτών αυτών είναι η αποκοπή κάποιας πιθανής DC συνιστώσας του σήματος. Τα σημεία μέσω των οποίων ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi ελέγχει την κατάσταση του διακόπτη, A και B, συνδέονται σε δύο ακίδες, τις J2. Στο ενδιάμεσο παρεμβάλλεται μια αντίσταση 100 Ω για κάθε σημείο με σκοπό την προστασία του. Στη συνέχεια, το σήμα μεταφέρεται είτε στο ζωνοπερατό φίλτρο BP0805A2160ASTR είτε στο BFCV-5270+, και τελικά σε έναν από τους δύο ανιχνευτές ισχύος AD8318. Για τους ανιχνευτές ισχύος το κύκλωμα είναι πανομοιότυπο με εξαίρεση την αντίσταση μέσω της οποίας γειώνεται το σημείο TADJ καθενός. Καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι συγκεκριμένες τιμές της αντίστασης αυτής βελτιστοποιούν τη λειτουργία του AD8318 σε συγκεκριμένες συχνότητες, για την πλευρά που μετρά την ισχύ σημάτων συχνότητας από 1.96 έως 2.36 GHz χρησιμοποιήθηκε αντίσταση 500 Ω, που είναι ιδανική για συχνότητα 2.2 GHz. Αντίστοιχα, για τη πλευρά που μετρά την ισχύ σημάτων συχνότητας από 4.04 έως 6.50 GHz χρησιμοποιήθηκε αντίσταση 1000 Ω, που είναι ιδανική για συχνότητα 5.8 GHz. Όσον αφορά τις υπόλοιπες συνδέσεις του AD8318, στο σημείο ENBL

συνδέεται τάση 5 V, κρατώντας τον ανιχνευτή ισχύος σταθερά ενεργοποιημένο. Η ίδια τάση χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία και εισάγεται μέσω των ακίδων J3 μαζί με τη γείωση. Η τάση των 5 V οδηγείται επιπρόσθετα στα σημεία VPSI και VPSO. Στα σημεία που εισέρχεται, και κοντά στον ανιχνευτή ισχύος, έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές χωρητικότητας 100 pF που οδηγούν στη γείωση, ώστε να εξαλείφεται ο θόρυβος. Τα σημεία του AD8318 που γειώνονται είναι τα CMIP και CMOP. Επιπλέον, η έξοδος VOOUT συνδέεται στην ακίδα J5 μέσω της οποίας μπορεί κανείς να μετρήσει την τάση εξόδου του ανιχνευτή ισχύος ώστε να προσδιορίσει τελικά την ισχύ του σήματος στην είσοδό του. Το σημείο VOOUT συνδέεται και με το σημείο VSET για την ενεργοποίηση της λειτουργίας μέτρησης του AD8318. Η ανατροφοδότηση γίνεται απευθείας χωρίς την παρεμβολή άλλων στοιχείων, κάτι που είναι απαραίτητο ώστε ο AD8318 να ικανοποιεί τις καμπύλες του Σχήματος 3.38. Τα σημεία από τα οποία εισέρχεται το σήμα στον ανιχνευτή ισχύος μόλις εξέρχεται από το φίλτρο είναι τα INHI και INLO. Τα ζωνοπερατά φίλτρα δεν μπορούν να αποκόψουν DC συνιστώσες, επομένως για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιούνται δύο πυκνωτές χωρητικότητας 1 nF στις εισόδους του σήματος. Επίσης, στις εισόδους INHI και INLO έχει τοποθετηθεί και μια αντίσταση 52.3 Ω παράλληλα. Η αντίσταση αυτή, σε συνδυασμό με την αντίσταση εισόδου του AD8318, προκαλεί τον σχηματισμό εμπέδησης περίπου 50 Ω, που είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων στις γραμμές μεταφοράς. Το σημείο CLPF του AD8318 παραμένει ασύνδετο, εξασφαλίζοντας τον ελάχιστο δυνατό χρόνο απόκρισης της συσκευής. Τέλος, στο κύκλωμα έχει προστεθεί και ένα LED (D1) ως ένδειξη ότι η πλακέτα είναι ενεργή. Η τελική μορφή της πλακέτας όπως σχεδιάστηκε στον PCB Editor του KiCad και η τοπολογία των εξαρτημάτων φαίνεται στο Σχήμα 3.40, ενώ στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.41, ακολουθεί μια φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας.



Σχήμα 3.40: Το σχέδιο της πλακέτας ανίχνευσης ισχύος, καθώς και η τοπολογία των εξαρτημάτων στον PCB Editor του KiCad.



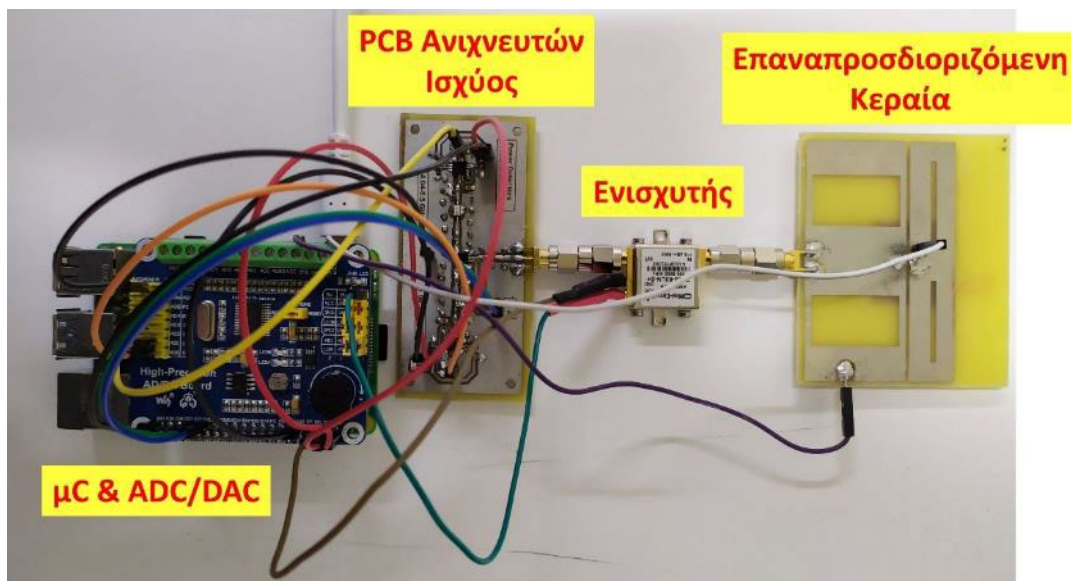
Σχήμα 3.41: Φωτογραφία της υλοποιημένης πλακέτας ανίχνευσης ισχύος.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.40 και το Σχήμα 3.41, η γραμμή μεταφοράς της εισόδου του σήματος στον διακόπτη RF έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι κάθετη ως προς τις εξόδους του διακόπτη. Με τον τρόπο αυτόν ελαττώνεται ο κίνδυνος παρεμβολών από τη μια γραμμή μεταφοράς στην άλλη. Επιπλέον, πολλά σημεία της γείωσης γύρω από τις γραμμές μεταφοράς έχουν συνδεθεί με την κάτω πλευρά της πλακέτας η οποία περιέχει ένα πεδίο γείωσης. Έτσι αποφεύγονται οι ασυνέχειες στη γείωση, και, κατ' επέκταση, στα RF σήματα προσφέρεται μια χαμηλής εμπέδησης γείωση, κάτι που συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων, του θορύβου και των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Διασύνδεση των διαφόρων μερών του συστήματος του δέκτη

Κατά την τελική συνδεσμολογία του υλοποιημένου συστήματος του δέκτη, η πλακέτα επέκτασης του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi (High-Precision AD/DA Board) τοποθετήθηκε πάνω στον μικροϋπολογιστή, στερεωμένη στην ακιδοσειρά GPIO. Η τροφοδοσία του Raspberry Pi έγινε μέσω ενός φορτιστή με ακροδέκτη USB-C, όπως και στην περίπτωση του συστήματος του πομπού. Για τη σύνδεση του Raspberry Pi στο διαδίκτυο, κάτι που ήταν απαραίτητο για την επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη αλλά και για την αποστολή των μετρήσεων στην απομακρυσμένη βάση δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε ένα καλώδιο Ethernet στην αντίστοιχη υποδοχή. Στην πλακέτα ανίχνευσης ισχύος του δέκτη, οι ακίδες εισόδου τροφοδοσίας 5 V και οι γειώσεις συνδέθηκαν μέσω καλωδίων με τα αντίστοιχα σημεία της ακιδοσειράς GPIO του Raspberry Pi. Επίσης, τα σημεία A και B του διακόπτη RF ο οποίος κατευθύνει το σήμα είτε προς το φίλτρο BP0805A2160ASTR είτε προς το BFCV-5270+, πριν αυτό καταλήξει σε έναν από τους δύο ανιχνευτές ισχύος, AD8318, συνδέθηκαν στις ακίδες GPIO5 και GPIO6 αντίστοιχα, οι οποίες επεκτείνονται στο πάνω μέρος της πλακέτας επέκτασης του Raspberry Pi όπως και οι υπόλοιπες ακίδες της ακιδοσειράς GPIO. Στην

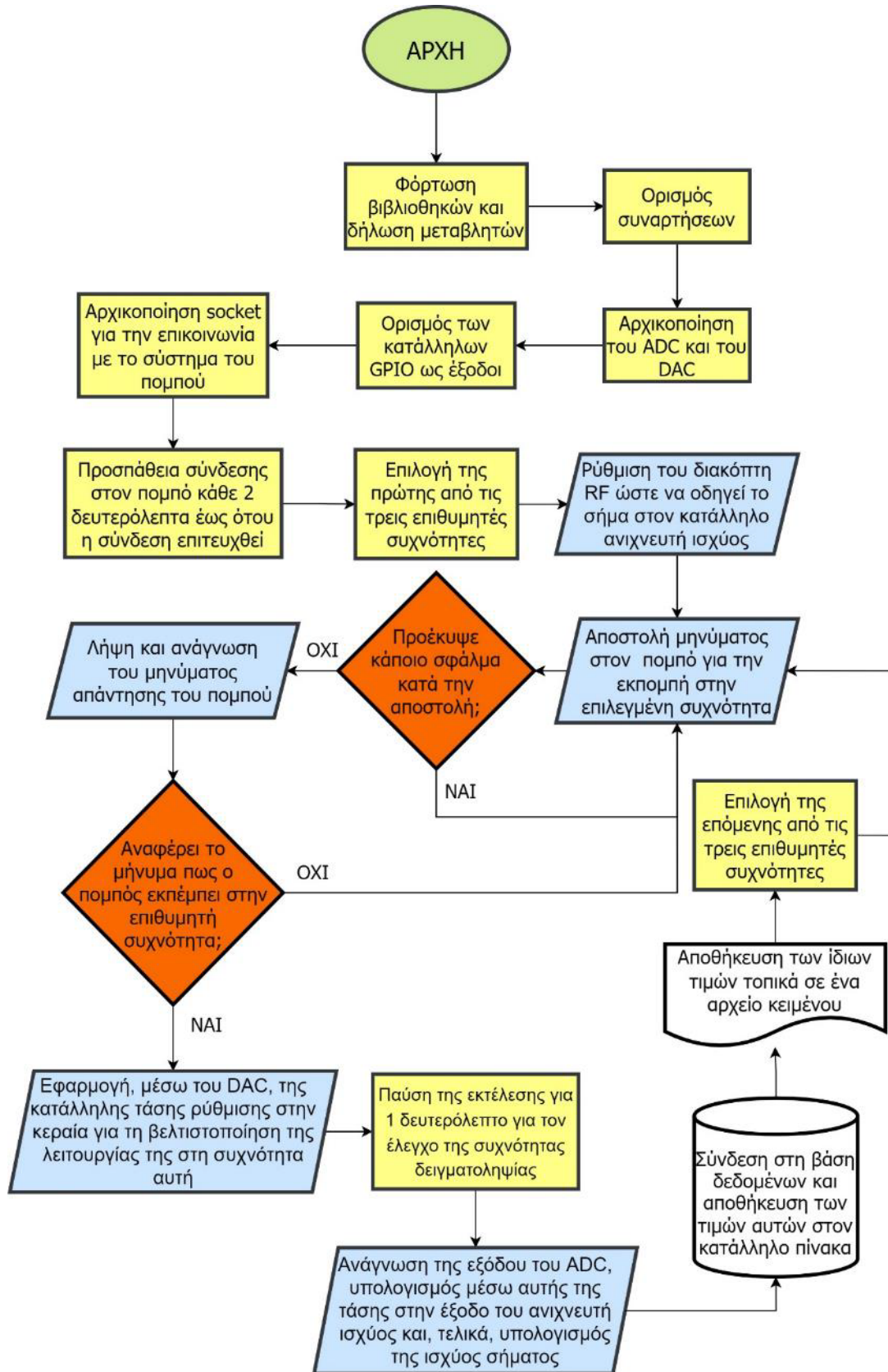
πλακέτα επέκτασης οι ακίδες αυτές αναγράφονται αντίστοιχα ως P21 και P22. Για την ανάγνωση της τάσης στην έξοδο καθενός από τους δύο AD8318, η έξοδος εκείνου στην πλευρά ανίχνευσης συχνοτήτων από 1.96 έως 2.36 GHz συνδέθηκε στο κανάλι 0 του ADC, ADS1256, ενώ η έξοδος εκείνου στην πλευρά ανίχνευσης συχνοτήτων από 4.04 έως 6.50 GHz συνδέθηκε στο κανάλι 1 του ADC. Τα κανάλια αυτά αναγράφονται στην πλακέτα επέκτασης ως AD0 και AD1 αντίστοιχα. Η είσοδος του ενισχυτή ZX60-83LN-S+ βιδώθηκε στην έξοδο της πλακέτας μέσω του κατάλληλου ομοαξονικού βύσματος, και στην έξοδό του βιδώθηκε αντίστοιχα η επαναπροσδιοριζόμενη κεραία. Η τροφοδοσία 5 V και η γείωση του ενισχυτή προήλθαν από την ακιδοσειρά GPIO. Για τη βελτιστοποίηση των συντονισμών της κεραίας, οδηγήθηκε σε αυτήν η τάση εξόδου του DAC, DAC8552, μέσω του καναλιού A, το οποίο αναγράφεται στην πλακέτα επέκτασης ως DAC0. Η τάση αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τον DAC ήταν 3.3 V, η οποία ορίστηκε μέσω του κατάλληλου βραχυκυκλωτήρα πάνω στην πλακέτα επέκτασης. Η τελική μορφή του υλοποιημένου, υπό δοκιμή συστήματος του δέκτη φαίνεται στην φωτογραφία του Σχήματος 3.42.



Σχήμα 3.42: Η τελική μορφή του υπό δοκιμή συστήματος του δέκτη.

3.4.2 Το λογισμικό μέρος του συστήματος του δέκτη

Στον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 4 του συστήματος του δέκτη τρέχει συνεχώς ο κατάλληλος κώδικας για τη μέτρηση και την καταγραφή της ισχύος σήματος. Ο δέκτης στέλνει ένα μήνυμα στον πομπό μέσω του οποίου ζητάει την εκπομπή σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Μόλις το αίτημα εκπληρωθεί ο δέκτης οδηγεί το λαμβανόμενο σήμα στον κατάλληλο ανιχνευτή ισχύος και μέσω της τάσης στην έξοδο υπολογίζει την ισχύ σήματος και την αποθηκεύει τοπικά αλλά και στην απομακρυσμένη βάση δεδομένων. Τα βασικά σημεία του κώδικα του δέκτη περιλαμβάνονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.43.



Σχήμα 3.43: Διάγραμμα ροής του κώδικα που τρέχει στον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi του συστήματος του δέκτη.

Κατά την εκτέλεση του κώδικα του δέκτη αρχικά φορτώνονται δύο επιπλέον αρχεία κώδικα, στο ένα εκ των οποίων ορίζεται μια κλάση για τον DAC, DAC8552, ενώ στο άλλο μια κλάση για τον ADC, ADS1256. Το αρχείο που κατασκευάστηκε για τον DAC552 είναι το ίδιο που χρησιμοποιήθηκε και στην περίπτωση του συστήματος του πομπού, με τη μόνη διαφορά να είναι πως η τάση αναφοράς του DAC ορίστηκε στο εσωτερικού του αρχείου ίση με 3.3 V, καθώς, ενώ στο σύστημα του πομπού η τάση αναφοράς ήταν 5 V, στο σύστημα του δέκτη ήταν 3.3 V. Στο αρχείο του ADC, στο εσωτερικό της κλάσης του έχουν οριστεί διάφορες συναρτήσεις. Μια συνάρτηση αφορά την αρχικοποίηση της συσκευής. Όπως και στην περίπτωση του πομπού, ορίζεται η λειτουργία 1 του Πίνακα B.2 του Παρατήματος Β για τη διεπαφή SPI, καθώς αυτή είναι εκείνη που υποστηρίζει ο ADC, σύμφωνα με την οποία λαμβάνει δεδομένα κατά το καθοδικό μέτωπο του παλμού ρολογιού, SCLK, και στέλνει δεδομένα κατά το ανοδικό μέτωπο. Για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της επικοινωνίας με τον ADC ορίζεται η ακίδα GPIO22 του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi ως έξοδος για το σήμα \overline{CS} . Επιπλέον, η ακίδα GPIO17 ορίζεται ως σημείο εισόδου του σήματος \overline{DRDY} , μέσω της τιμής του οποίου, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.2.4, μπορεί να γίνει αντιληπτό αν υπάρχουν δεδομένα από κάποια μετατροπή τάσης για ανάγνωση. Αντίστοιχα, για το σήμα \overline{RESET} που επαναφέρει τον ADC, τίθεται ως έξοδος η ακίδα GPIO18. Η γραμμή αυτή χρησιμοποιείται από μια συνάρτηση η οποία καλείται όταν είναι απαραίτητη η επαναφορά του ADC στην αρχική του κατάσταση, πριν από κάποια μέτρηση. Μια άλλη συνάρτηση σταματά την εκτέλεση μέχρι να υπάρξει η ένδειξη μέσω του \overline{DRDY} πως είναι διαθέσιμο το αποτέλεσμα της μετατροπής κάποιας τιμής τάσης. Επιπλέον, μια ακόμα από τις συναρτήσεις της κλάσης χρησιμοποιείται για την αποστολή εντολών μεγέθους 8 bits. Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.2.4, οι εντολές αυτές είναι οι WREG, SYNC, WAKEUP και RDATA, οι οποίες αποστέλλονται με αυτήν τη σειρά στον ADC για την ανάγνωση του αποτελέσματος της μετατροπής μιας τάσης σε δυαδική τιμή. Για την εγγραφή ρυθμίσεων στον ADS1256 χρησιμοποιείται μια ακόμα συνάρτηση. Για τους σκοπούς του διδακτορικού, μέσω αυτής ορίστηκε για τον ADC ρυθμός δειγματοληψίας 10 SPS και η τιμή του PGA ίση με 1. Όπως και στη περίπτωση του πομπού, για τη πρόσβαση στο SPI και την αποστολή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη `spidev`, για την εισαγωγή καθυστερήσεων όπου ήταν απαραίτητες η βιβλιοθήκη `time`, ενώ για τον ορισμό των ακίδων GPIO και τον έλεγχό τους η βιβλιοθήκη `RPi.GPIO`.

Στο κύριο αρχείο του κώδικα του δέκτη, αφού φορτωθούν τα αρχεία με τις κλάσεις για τον ADC και τον DAC, φορτώνονται κάποιες επιπλέον βιβλιοθήκες. Οι βιβλιοθήκες αυτές είναι οι `datetime`, `os`, `pyodbc` και `socket`. Η βιβλιοθήκη `datetime` χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ημερομηνίας και της ώρας που λαμβάνεται κάθε μέτρηση. Η βιβλιοθήκη `os` προσφέρει πρόσβαση στο σύστημα αρχείων του λειτουργικού συστήματος Raspberry Pi OS, και είναι απαραίτητη για την κατασκευή φακέλων και αρχείων ώστε να καταγραφούν αργότερα οι μετρήσεις. Η βιβλιοθήκη `pyodbc` διευκολύνει την πρόσβαση του Raspberry Pi σε βάσεις δεδομένων ODBC (Microsoft Open Database Connectivity), όπως είναι εκείνη που

χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Όπως και στην περίπτωση του πομπού, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη socket για την κατασκευή ενός socket μέσω του οποίου μπορεί να πραγματοποιηθεί απομακρυσμένα η αποστολή μηνυμάτων μεταξύ πομπού και δέκτη.

Αφού φορτωθούν όλες οι βιβλιοθήκες, δηλώνονται οι απαραίτητες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται αργότερα στον κώδικα. Μέσω των μεταβλητών αυτών, για τον διακόπτη RF, τα σημεία ελέγχου της κατάστασής του A και B αντιστοιχίζονται στις ακίδες GPIO5 και GPIO6. Επιπλέον, στο σημείο αυτό εισάγεται η διεύθυνση IP του πομπού, ο αριθμός θύρας του socket, ενώ επιπλέον δηλώνεται και μια συμβολοσειρά που περιλαμβάνει τα απαραίτητα στοιχεία για τη σύνδεση στη βάση δεδομένων, όπως τη διεύθυνση IP, τον αριθμό θύρας, το όνομα της βάσης δεδομένων, το όνομα χρήστη, τον κωδικό πρόσβασης του χρήστη και την έκδοση του πρωτοκόλλου TDS (Ροή Δεδομένων Πίνακα, Tabular Data Stream) το οποίο χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με βάσεις δεδομένων.

Μετά τη δήλωση των μεταβλητών ορίζονται και κάποιες συναρτήσεις. Αρχικά ορίζεται μια συνάρτηση η οποία όταν καλείται προσπαθεί κάθε 2 δευτερόλεπτα να ξεκινήσει μια σύνδεση μεταξύ του συστήματος του δέκτη με αυτό του πομπού, μέσω του αντικειμένου socket που ορίστηκε. Μια δεύτερη συνάρτηση αναλαμβάνει την αποθήκευση των μετρήσεων στη βάση δεδομένων. Μέσω αυτής εκτελείται μια εντολή SQL (Structure Query Language) για την εισαγωγή δεδομένων στον κατάλληλο πίνακα. Μια επιπλέον συνάρτηση, όταν καλείται αποθηκεύει τις μετρήσεις επιπρόσθετα και τοπικά σε αρχεία κειμένου. Με τη συνάρτηση αυτή, για κάθε μια από τις τρεις συχνότητες, 2.07, 4.63 και 6.22 GHz, κατασκευάζεται ένας φάκελος εάν δεν υπάρχει ήδη. Στο εσωτερικό του κάθε φακέλου δημιουργούνται τα αρχεία κειμένου. Κάθε μέρα κατασκευάζεται ένα νέο αρχείο με την ημερομηνία να χρησιμοποιείται ως όνομα αυτού. Σε κάθε αρχείο αποθηκεύονται τα δεδομένα της εξόδου του ADC, η τιμή τάσης που υπολογίζεται από αυτά, η τιμή της ισχύος που υπολογίζεται με τη σειρά της από την τάση και η ώρα της μέτρησης. Μια ακόμα συνάρτηση αναλαμβάνει την εφαρμογή της κατάλληλης τάσης στη δίοδο που βρίσκεται στο πίσω μέρος της επαναπροσδιοριζόμενης κεραίας που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, φροντίζοντας έτσι τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της κεραίας στην τιμή της εκάστοτε λαμβανόμενης από τον δέκτη συχνότητας. Ακολουθεί ο ορισμός μιας επιπλέον συνάρτησης, η οποία διαβάζει τα δεδομένα από την κωδικοποίηση της τάσης που έγινε στον ADC, και στη συνέχεια υπολογίζει την τιμή της τάσης και μέσω αυτής την ισχύ σήματος με ακρίβεια 5 δεκαδικών ψηφίων.

Μια τελευταία συνάρτηση καλείται πρώτη κατά την εκτέλεση και περιλαμβάνει την κύρια λογική. Στο εσωτερικό της καλούνται όλες οι προαναφερθείσες συναρτήσεις. Κατά την εκτέλεση του κυρίως κώδικα που περιλαμβάνεται στη συνάρτηση αυτή, το πρώτο βήμα είναι η αρχικοποίηση του ADC και του DAC με το κάλεσμα των κλάσεών τους. Έπειτα οι ακίδες για τον έλεγχο του διακόπτη RF ορίζονται ως έξοδοι. Ακολουθεί η δημιουργία του αντικειμένου socket για τη σύνδεση του δέκτη με το σύστημα του πομπού, και αμέσως μετά καλείται η συνάρτηση που πραγματοποιεί τη σύνδεση αυτή. Μόλις επιτευχθεί σύνδεση με το σύστημα

του πομπού, πραγματοποιείται επιπλέον και η σύνδεση με τη βάση δεδομένων. Το επόμενο μέρος του κώδικα επαναλαμβάνεται συνεχώς για τη λήψη και την καταγραφή των μετρήσεων. Αρχικά, ο δέκτης επιλέγει την πρώτη από τις τρεις συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 οι οποίες καλούνται στον δέκτη “freq_2”, “freq_4” και “freq_6” αντίστοιχα, όπως και στον κώδικα του πομπού. Ανάλογα με τη συχνότητα που επιλέχθηκε, ο διακόπτης RF ρυθμίζεται μέσω των ακίδων GPIO ώστε να οδηγήσει το σήμα σε εκείνον από τους δύο ανιχνευτές ισχύος ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη λήψη σημάτων της συχνότητας αυτής. Ακολουθεί η αποστολή μηνύματος από τον δέκτη στον πομπό, στο οποίο περιλαμβάνεται η επιθυμητή συχνότητα εκπομπής όπου ο δέκτης αναμένει να μετρήσει την ισχύ σήματος. Το μήνυμα αυτό περιέχει τη φράση “Transmit on Frequency” ακολουθούμενη από την ονομασία της συχνότητας που επιλέχθηκε. Αν υπάρξει κάποιο πρόβλημα, τότε ο δέκτης προσπαθεί να στείλει ξανά το μήνυμα κάθε 2 δευτερόλεπτα. Μόλις ο δέκτης λάβει ένα μήνυμα απάντησης από τον πομπό ελέγχει αν έχει την αναμενόμενη μορφή. Αν όχι, στέλνει πάλι μήνυμα με την επιθυμητή συχνότητα εκπομπής. Αν το μήνυμα απάντησης του πομπού ενημερώνει τον δέκτη για τη συχνότητα εκπομπής, αν δηλαδή περιέχει τη φράση “Transmitting on Frequency” ακολουθούμενη από τη συχνότητα που ζήτησε ο δέκτης, τότε καλείται η συνάρτηση για την εφαρμογή, μέσω του DAC, της κατάλληλης τάσης στην επαναπροσδιοριζόμενη κεραία, θέτοντας την έτσι στη βέλτιστη λειτουργία για τη συγκεκριμένη συχνότητα. Στο επόμενο βήμα εισέρχεται μια παύση 1 δευτερολέπτου στην εκτέλεση του κώδικα, σκοπός της οποίας είναι ο έλεγχος του χρόνου δειγματοληψίας. Στη συνέχεια καλείται η συνάρτηση για την ανάγνωση της τάσης στην έξοδο του ανιχνευτή ισχύος και τον υπολογισμό μέσω αυτής της ισχύος του σήματος που έλαβε ο δέκτης. Για τον υπολογισμό της τάσης από τα δεδομένα του ADC χρησιμοποιείται η σχέση (3.2), η οποία, καθώς η τάση αναφοράς είναι 2.5 V, αν μετασχηματιστεί ως προς την τάση γίνεται:

$$V = D_{OUT} \frac{5}{8388608}, \quad (3.6)$$

όπου V είναι η τάση που ο ADC κωδικοποίησε σε έναν δυαδικό αριθμό ίσο με D_{OUT} . Μόλις υπολογιστεί η τάση μέσω της σχέσης (3.6), υπολογίζεται και η ισχύς σήματος. Αν η συχνότητα του σήματος είναι 2.07 GHz, τότε χρησιμοποιείται η σχέση (3.4) μετασχηματισμένη ως προς την ισχύ σήματος (P), δηλαδή:

$$P = -40.9836V + 19.6, \quad (3.7)$$

ενώ, αντίστοιχα, αν η συχνότητα του σήματος είναι είτε 4.63 GHz είτε 6.22 GHz, η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η (3.5) μετασχηματισμένη ως προς τη συχνότητα, δηλαδή:

$$P = -40V + 25. \quad (3.8)$$

Με την τιμή της ισχύος σήματος να έχει πλέον υπολογιστεί, καλείται η συνάρτηση που αποθηκεύει τις τιμές D_{OUT} , V και P στην απομακρυσμένη βάση δεδομένων, και στη συνέχεια και εκείνη η συνάρτηση που αποθηκεύει τις ίδιες τιμές τοπικά σε αρχεία κειμένου. Εάν για κάποιον λόγο δεν ήταν δυνατή η εισαγωγή των μετρήσεων στη βάση δεδομένων, τότε εμφανίζεται το κατάλληλο μήνυμα και οι μετρήσεις αποθηκεύονται κανονικά στα αρχεία κειμένου στη μνήμη του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi. Τέλος, με την ολοκλήρωση της καταγραφής των μετρήσεων, η εκτέλεση του κώδικα επανέρχεται στο σημείο επιλογής συχνότητας. Επιλέγεται η επόμενη συχνότητα από τις τρεις και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε συχνότητα.

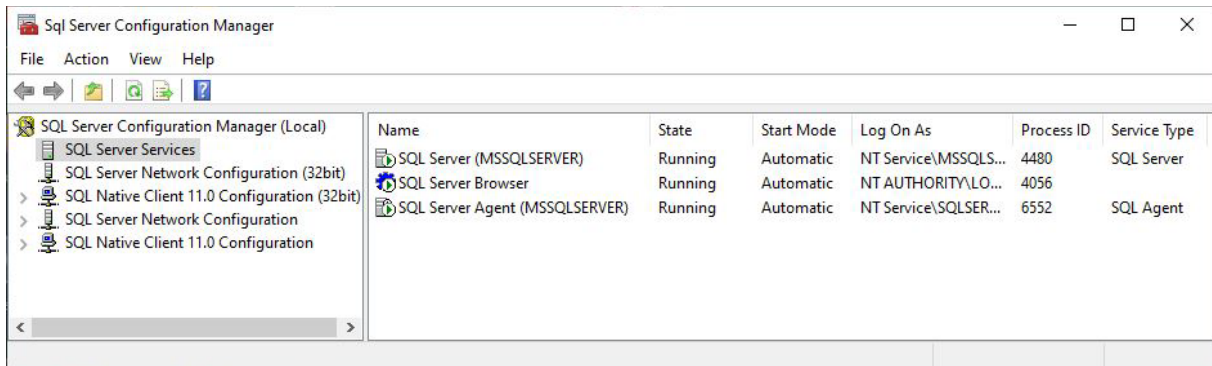
Τόσο για τον ADC όσο και για τον DAC, χρησιμοποιήθηκε η διεπαφή SPI του Raspberry Pi που αποκαλείται SPI0. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η ανεξάρτητη συνδεσμολογία του SPI, με βάση την οποία για κάθε συνδεδεμένη συσκευή χρησιμοποιεί τη δικιά της γραμμή \overline{CS} , αλλά την ίδια γραμμή MOSI για τη λήψη δεδομένων. Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του πομπού, στη διεπαφή SPI0 η γραμμή MISO αντιστοιχεί στην ακίδα GPIO10, ενώ η ακίδα GPIO11 αντιστοιχεί στο σήμα ρολογιού, SCLK. Στην περίπτωση του ADC αλλά και του DAC η γραμμή \overline{CS} συνδέεται μέσω της πλακέτας επέκτασης High-Precision AD/DA Board στις ακίδες GPIO22 και GPIO23 αντίστοιχα. Ο ADC χρησιμοποιεί επιπρόσθετα και τη γραμμή MISO του SPI, καθώς, επιπλέον της λήψης, είναι απαραίτητη και η αποστολή δεδομένων στο Raspberry Pi. Η γραμμή MISO σε αυτήν την περίπτωση αντιστοιχεί στην ακίδα GPIO9 κατά τη χρήση της διεπαφής SPI0.

3.4.3 Η βάση δεδομένων

Για την απομακρυσμένη αποθήκευση των δεδομένων που λαμβάνονται από το σύστημα του δέκτη εγκαταστάθηκε μια βάση δεδομένων σε έναν σταθερό υπολογιστή. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκε ο Microsoft SQL Server, ένα σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων που αναπτύχθηκε από τη Microsoft, σχεδιασμένο για την αποτελεσματική αποθήκευση, ανάκτηση και διαχείριση δεδομένων. Ακολουθεί το σχεσιακό μοντέλο, οργανώνοντας τα δεδομένα σε γραμμές και στήλες πινάκων, διευκολύνοντας την αναζήτηση και επεξεργασία τους με τη χρήση της γλώσσας SQL. Προσφέρει επιπλέον χρήσιμες λειτουργίες που συνεισφέρουν στην αύξηση της ασφάλειας, όπως είναι η κρυπτογράφηση, ο έλεγχος ταυτότητας μέσω της κατασκευής χρηστών, καθώς και διάφοροι μηχανισμοί εξουσιοδότησης για την προστασία των δεδομένων [132].

Για τις βασικές ρυθμίσεις του συγκεκριμένου SQL server χρησιμοποιήθηκε ο Microsoft SQL Server Configuration Manager. Πρόκειται για ένα σημαντικό εργαλείο για τη διαμόρφωση και τη διαχείριση του SQL Server και των σχετικών υπηρεσιών. Παρέχει μια κεντρική διεπαφή για την προσαρμογή διαφόρων ρυθμίσεων, όπως πρωτόκολλα δικτύου, ψευδώνυμα για τον server, λογαριασμούς υπηρεσιών κλπ. Μέσω αυτού, μπορεί να ενεργοποιηθεί ή να απενεργοποιηθεί ο SQL server όταν είναι απαραίτητο. Επιπλέον, με τον Configuration Manager, μπορούν εύκολα να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν και διάφορα

πρωτόκολλα δικτύου, όπως είναι το TCP/IP, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη συνδεσιμότητα για τις εφαρμογές που τρέχουν σε κάποιον client. Μέσω της δημιουργίας και της διαχείρισης ψευδωνύμων για τον server μπορεί να απλοποιηθεί η διαδικασία σύνδεσης σε αυτόν, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιβάλλοντα που περιλαμβάνουν πολλούς servers [133]. Στο Σχήμα 3.44 φαίνεται η διεπαφή του SQL Server Configuration Manager.



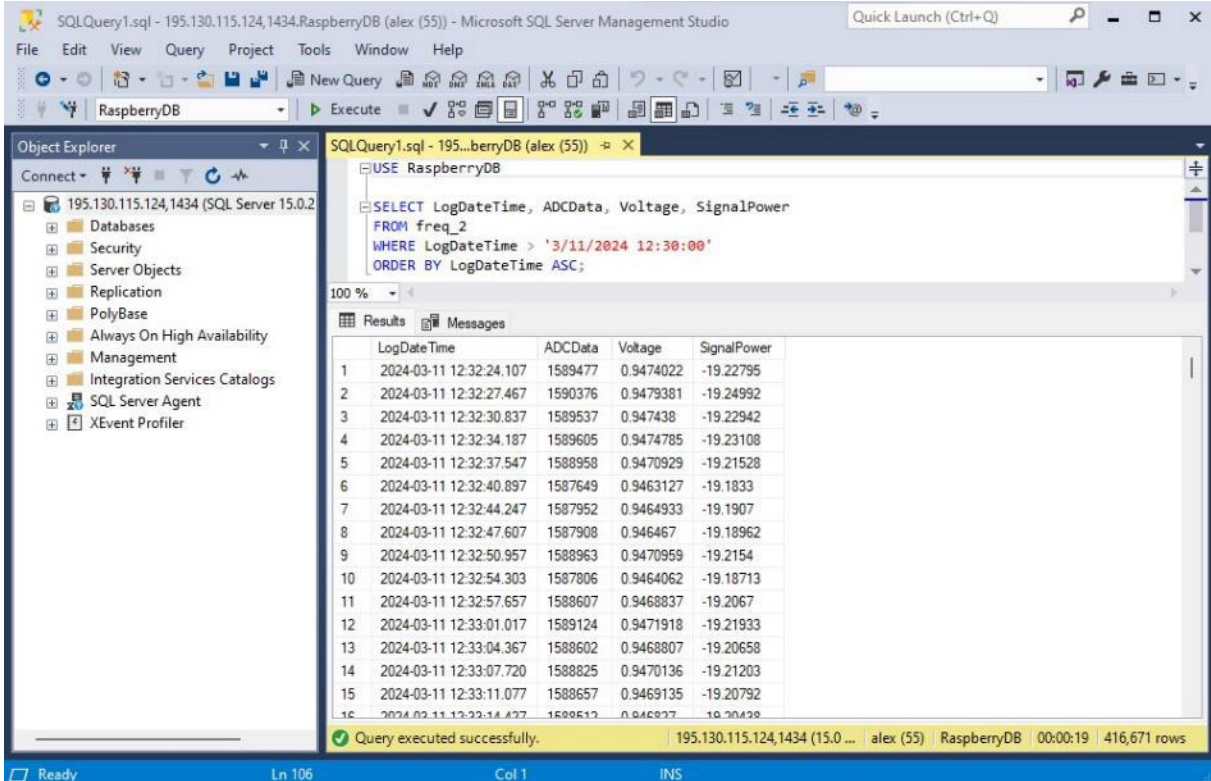
Σχήμα 3.44: Η διεπαφή του SQL Server Configuration Manager.

Έπειτα από τις βασικές ρυθμίσεις μέσω του SQL Server Configuration Manager, για την πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί στους πίνακες της βάσης δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον SQL Server Management Studio (SSMS). Αυτό χρησιμεύει ως κεντρικός κόμβος για τη διαχείριση της υποδομής του SQL Server, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη σειρά εργαλείων για διαχειριστές βάσεων δεδομένων και προγραμματιστές. Μέσω αυτού μπορούν να γραφούν και να εκτελεστούν μέσα στη βάση δεδομένων κώδικες SQL. Για την εύκολη διαχείριση σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται πολλές βάσεις δεδομένων, το περιβάλλον περιλαμβάνει μια ιεραρχική προβολή προσφέροντας εύκολη πρόσβαση σε κάθε μια από αυτές. Το SSMS προσφέρει ακόμα διάφορα εργαλεία για την παρακολούθηση διεργασιών, της χρήσης πόρων και γενικά των επιδόσεων σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, το περιβάλλον διαθέτει τη δυνατότητα δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας και επαναφοράς από αυτά, για την προστασία από την πιθανή απώλεια δεδομένων.

Μέσω του SSMS μπορούν να δημιουργηθούν λογαριασμοί χρηστών της βάσης δεδομένων και να ελέγχονται τα δικαιώματα του καθενός μέσα σε αυτήν. Κατά την πρώτη χρήση μιας βάσης δεδομένων θα πρέπει αρχικά κάποιος να συνδεθεί τοπικά από τον υπολογιστή όπου έχει εγκατασταθεί και να δημιουργήσει κάποιον λογαριασμό χρήστη. Έτσι, για την αποστολή δεδομένων από τον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi του δέκτη κατασκευάστηκε ένας συγκεκριμένος χρήστης. Αν η βάση δεδομένων ρυθμιστεί ώστε να επιτρέπει την απομακρυσμένη σύνδεση τότε, μέσω του MSSQL, μπορεί κανείς να συνδέεται με το όνομα χρήστη και τον κωδικό πρόσβασης από όπου κι αν βρίσκεται [134]. Στην περίπτωση του Raspberry Pi, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα οδήγησης (driver) ODBC, που επιτρέπει τη σύνδεση και την αποστολή δεδομένων στη βάση δεδομένων μέσα από έναν υπό

εκτέλεση κώδικα, όπως αυτόν του δέκτη, χωρίς τη μεσολάβηση του SSMS [135]. Για την προβολή των δεδομένων χρησιμοποιούνται το SSMS.

Στο Σχήμα 3.45 φαίνεται μια εικόνα από το περιβάλλον του SSMS, με ένα παράδειγμα πραγματικών δεδομένων που καταγράφηκαν από το σύστημα του δέκτη για τη συχνότητα των 2.07 GHz.



The screenshot shows the SQL Server Management Studio interface. The query window contains the following SQL code:

```
USE RaspberryDB
SELECT LogDateTime, ADCData, Voltage, SignalPower
FROM freq_2
WHERE LogDateTime > '3/11/2024 12:30:00'
ORDER BY LogDateTime ASC;
```

The Results pane displays the following data:

	LogDateTime	ADCData	Voltage	SignalPower
1	2024-03-11 12:32:24.107	1589477	0.9474022	-19.22795
2	2024-03-11 12:32:27.467	1590376	0.9479381	-19.24992
3	2024-03-11 12:32:30.837	1589537	0.947438	-19.22942
4	2024-03-11 12:32:34.187	1589605	0.9474785	-19.23108
5	2024-03-11 12:32:37.547	1588958	0.9470929	-19.21528
6	2024-03-11 12:32:40.897	1587649	0.9463127	-19.1833
7	2024-03-11 12:32:44.247	1587952	0.9464933	-19.1907
8	2024-03-11 12:32:47.607	1587908	0.946467	-19.18962
9	2024-03-11 12:32:50.957	1588963	0.9470959	-19.2154
10	2024-03-11 12:32:54.303	1587806	0.9464062	-19.18713
11	2024-03-11 12:32:57.657	1588607	0.9468837	-19.2067
12	2024-03-11 12:33:01.017	1589124	0.9471918	-19.21933
13	2024-03-11 12:33:04.367	1588602	0.9468807	-19.20658
14	2024-03-11 12:33:07.720	1588825	0.9470136	-19.21203
15	2024-03-11 12:33:11.077	1588657	0.9469135	-19.20792

The status bar at the bottom indicates: Query executed successfully. | 195.130.115.124,1434 (15.0 ... | alex (55) | RaspberryDB | 00:00:19 | 416,671 rows

Σχήμα 3.45: Το περιβάλλον του SQL Server Management Studio και ένα παράδειγμα πραγματικών δεδομένων που καταγράφηκαν από το σύστημα του δέκτη για τη συχνότητα των 2.07 GHz.

3.4.4 Ευαισθησία, λόγος σήματος προς θόρυβο και ανάλυση του συστήματος του δέκτη
 Η ευαισθησία του δέκτη, ποια δηλαδή είναι η ελάχιστη ισχύς σήματος που μπορεί να ανιχνευτεί από αυτόν, είναι ουσιαστικά η ευαισθησία των ανιχνευτών ισχύος, AD8318, που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως φαίνεται και από τις γραφικές αναπαραστάσεις του Σχήματος 3.38, η ευαισθησία είναι περίπου -55 dBm για τον ανιχνευτή ισχύος που χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις σε συχνότητα 2.07 GHz, και περίπου -60 dBm για τον ανιχνευτή ισχύος που χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις σε συχνότητα 4.63 ή 6.22 GHz. Στις μετρήσεις ισχύος που έγιναν με το σύστημα του δέκτη η ισχύς του σήματος συχνότητας 2.07 GHz ήταν περίπου -19 dBm, ενώ η ισχύς των σημάτων συχνότητας 4.63 και 6.22 GHz ήταν περίπου -47 dBm. Σύμφωνα με το ίδιο σχήμα, το σφάλμα του ανιχνευτή ισχύος κατά τη μετατροπή της ισχύος σε τάση είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερο του 0.1 dB.

Για τον υπολογισμό του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) του συστήματος του δέκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P}{N} \right), \quad (3.9)$$

όπου P είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος και N είναι ο θόρυβος που υπεισέρχεται κατά την κβάντωση του σήματος από τον ADC. Αν ο ADC θεωρηθεί πως είναι ιδανικός, καθώς και ότι το πλάτος του εισερχόμενου σήματος δεν υπερβαίνει τα όρια εντός των οποίων μπορεί να μετρηθεί από τον ADC, τότε η σχέση (3.9) λαμβάνει τη μορφή:

$$SNR = 6.02b + 1.76, \quad (3.10)$$

όπου b είναι η ανάλυση του ADC σε bits [136,137]. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.2.4, ο ADC του συστήματος του δέκτη της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ADS1256, ρυθμίστηκε ώστε να χρησιμοποιεί συχνότητα δειγματοληψίας 10 SPS, ενώ η τιμή του PGA ήταν 1. Με βάση αυτήν τη ρύθμιση, αν από τα συνολικά bits του ADC εξαιρεθεί εξολοκλήρου ο θόρυβος, το καθαρό πλέον σήμα αντιστοιχεί σε 22.3 bits. Χρησιμοποιώντας την τιμή αυτή στη θέση του b της σχέσης (3.10) υπολογίζεται πως ο λόγος σήματος προς θόρυβο του συστήματος είναι $SNR = 136 \text{ dB}$.

Όσον αφορά την ανάλυση του ADC, σύμφωνα με την περιγραφή της ενότητας 3.2.4, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$RES_{ADC} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^b}, \quad (3.11)$$

όπου V_{min} και V_{max} είναι αντίστοιχα η ελάχιστη και η μέγιστη τάση που μπορεί να μετρήσει ο ADC. Οι τιμές αυτών των τιμών για τον ADS1256 είναι $V_{min} = -\frac{2V_{ref}}{PGA}$ και $V_{max} = +\frac{2V_{ref}}{PGA}$ σύμφωνα με την ενότητα 3.2.4, όπου V_{ref} είναι η τάση αναφοράς η οποία, στην περίπτωση του ADS1256, ισούται με 2.5 V. Αν χρησιμοποιηθεί για το b ξανά η τιμή 22.3 bits που αντιστοιχεί στα bits που παραμένουν αν εξαιρεθεί ο θόρυβος, τότε η ανάλυση του ADC υπολογίζεται $RES_{ADC} = 1.9 \mu V$.

Η ανάλυση ως προς την ισχύ του σήματος μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παραπάνω τιμής της ανάλυσης ως προς την τάση. Λαμβάνοντας υπόψη την κλίση της ευθείας που περιγράφεται από τις εξισώσεις (3.7) για τη συχνότητα των 2.07 GHz και (3.8) για τις συχνότητες 4.63 και 6.22 GHz, μπορεί να υπολογιστεί η ανάλυση ως προς την ισχύ σήματος που μπορεί να ανιχνεύσει ο ADC αφού αυτό μετατραπεί σε τάση από τους ανιχνευτές ισχύος. Η κλίση των ευθειών των σχέσεων (3.7) και (3.8) είναι -40 dB/V στην πρώτη και -41 dB/V στη δεύτερη περίπτωση. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση του ADC ως προς την τάση,

δηλαδή $1.9 \mu\text{V}$, η ανάλυση ως προς την ισχύ βρίσκεται και στις δύο περιπτώσεις $0.8 \times 10^{-5} \text{ dB}$.

Υλοποίηση Επαναπροσδιοριζόμενης Κεραίας για το Σύστημα του Δέκτη

4.1 Εισαγωγή

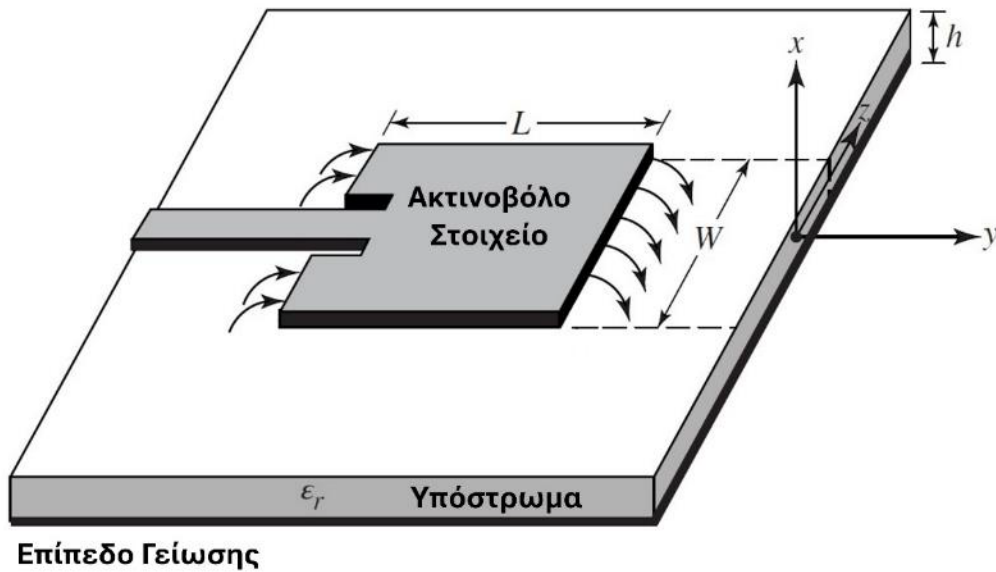
Ως μέρος της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης η οποία υλοποιήθηκε για τους σκοπούς της διατριβής και η οποία περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, υλοποιήθηκε επιπλέον και μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία μικροταινίας (microstrip) ως μέρος του συστήματος του δέκτη. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, η κεραία χρησιμοποιεί μια δίοδο η τάση στα άκρα της οποίας επηρεάζει την απόκριση συχνοτήτων της, ορίζοντας έτσι τρεις βασικούς τρόπους λειτουργίας για τη βέλτιστη αποδοτικότητα σε συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Η κεραία περιγράφεται πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο αυτό.

4.2 Κεραίες μικροταινίας

Οι κεραίες μικροταινίας, οι οποίες συχνά αναφέρονται και ως κεραίες patch, είναι ένας τύπος κεραιών που χαρακτηρίζονται από τις μικρές τους διαστάσεις, την ευκολία κατασκευής και την ευελιξία τους σε διάφορες εφαρμογές. Αυτές οι κεραίες αποτελούνται από ένα πολύ λεπτό μεταλλικό ακτινοβόλο στοιχείο (patch) στη μία πλευρά ενός διηλεκτρικού υποστρώματος, με ένα συνεχές μεταλλικό επίπεδο γείωσης στην άλλη πλευρά. Ονομάζονται έτσι λόγω της γραμμής που χρησιμοποιείται για την είσοδο ή έξοδο σήματος (μικροταινία). Το ακτινοβόλο στοιχείο μπορεί να έχει διάφορα σχήματα, όπως ορθογώνιο, κυκλικό, ελλειπτικό, δακτυλιοειδές κλπ., με το ορθογώνιο σχήμα να είναι το πιο συνηθισμένο λόγω της απλότητάς του στην ανάλυση και τον σχεδιασμό.

Για το υπόστρωμα τέτοιων κεραιών υπάρχει μια πληθώρα επιλογών που μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς. Ένα από τα πιο συνηθισμένα υποστρώματα αποτελεί το PTFE (polytetrafluorethylene, πολυτετραφθοροαιθυλένιο). Πρόκειται για ένα υπόστρωμα που αποτελείται από πολυτετραφθοροαιθυλένιο ενισχυμένο με υφασμένα ελάσματα γυαλιού. Πολύ συχνά χρησιμοποιούμενο είναι και ένα δεύτερο υπόστρωμα, το FR4 (Flame Retardant 4, Επιβραδυντικό Φλόγας 4). Το συγκεκριμένο υπόστρωμα κατασκευάζεται από υφασμένο υαλοβάμβακα διαποτισμένο με συνδετικό υλικό εποξειδικής ρητίνης. Η διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) του υποστρώματος συνήθως κυμαίνεται στο εύρος $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$.

Η γενική μορφή μιας κεραίας μικροταινίας με ορθογώνιο ακτινοβόλο στοιχείο φαίνεται στο Σχήμα 4.1, καθώς και η οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το ακτινοβόλο στοιχείο.



Σχήμα 4.1: Η γενική μορφή μιας κεραίας μικροταινίας με ορθογώνιο ακτινοβόλο στοιχείο, καθώς και οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου.

Στις κεραίες μικροταινίας, το ακτινοβόλο στοιχείο έχει πολύ μικρό πάχος (t) συγκριτικά με το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ή λαμβανόμενου σήματος στο κενό (λ_0). Το πάχος του υποστρώματος (h) ανήκει γενικά στο εύρος τιμών $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$. Με την είσοδο σήματος στην κεραία σχηματίζονται μεταβαλλόμενα επιφανειακά ρεύματα πάνω στο ακτινοβόλο στοιχείο, και κατά συνέπεια μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Καθώς οι διαστάσεις του ακτινοβόλου στοιχείου αλλά και της μικροταινίας είναι πεπερασμένες, στα άκρα αυτών εμφανίζονται περιφερειακές δυναμικές γραμμές των πεδίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ακτινοβόλο στοιχείο καθώς και η μικροταινία να εμφανίζονται ηλεκτρικά μεγαλύτερα από τις φυσικές τους διαστάσεις, καθώς επίσης και οι δυναμικές γραμμές να μην περιορίζονται εντός μόνο του υποστρώματος, αλλά να επεκτείνονται και στον αέρα. Κατά συνέπεια η διηλεκτρική σταθερά εμφανίζεται στην πράξη μικρότερη από την πραγματική της τιμή και ονομάζεται ενεργός διηλεκτρική σταθερά (ϵ_{eff}). Στην περίπτωση μιας κεραίας με ορθογώνιο ακτινοβολούμενο στοιχείο όπως αυτή του παραδείγματος του Σχήματος 4.1, η ενεργός διηλεκτρική σταθερά μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.1)$$

όπου W είναι το πλάτος του ακτινοβόλου στοιχείου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1. Αντίστοιχα ορίζεται το ενεργό μήκος του ακτινοβόλου στοιχείου (L_{eff}) ως προς το πραγματικό μήκος (L) μέσω της σχέσης:

$$L_{eff} = L + 2\Delta L, \quad (4.2)$$

όπου η τιμή του ΔL δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}. \quad (4.3)$$

Η βασική συχνότητα συντονισμού (f_r) της κεραιάς συσχετίζεται με το ενεργό μήκος (L_{eff}) και το πλάτος (W) του ακτινοβόλου στοιχείου σύμφωνα με τις προσεγγιστικές σχέσεις:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (4.2)$$

και

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (4.3)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός [6].

4.3 Επαναπροσδιοριζόμενες κεραιές

Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών έχει οδηγήσει το τελευταίο διάστημα στην ανάγκη για συστήματα τα οποία να υποστηρίζουν διάφορα πρότυπα επικοινωνίας. Τέτοια συστήματα μπορούν να επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από επαναπροσδιοριζόμενες κεραιές, οι οποίες μπορούν να λειτουργούν σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων, διαγράμματα ακτινοβολίας και πολώσεις. Οι επαναπροσδιοριζόμενες κεραιές χρησιμοποιούνται σήμερα σε γνωστικά ραδιοσυστήματα (CR, Cognitive Radio), δορυφορικές επικοινωνίες, συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (MIMO, Multiple-Input Multiple-Output), βιοϊατρικές εφαρμογές, καθώς και σε στρατιωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές [138,139]. Η διαδικασία σχεδιασμού τους μπορεί να είναι επίπονη λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Η επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων για διαφορετικά χαρακτηριστικά της κεραιάς (απόκριση συχνοτήτων, κέρδος, εμπέδηση κ.λπ.) με την παράλληλη διασφάλιση ότι τα αποτελέσματα αυτά παραμένουν ικανοποιητικά για όλους τους τρόπους λειτουργίας της κεραιάς, αποτελεί πρόκληση. Επίσης, ανάλογα με τον μηχανισμό επαναπροσδιορισμού που χρησιμοποιείται,

πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορες παράμετροι, όπως τα συστήματα που είναι απαραίτητα για την παροχή της απαιτούμενης τροφοδοσίας στα ηλεκτρονικά στοιχεία της κεραίας, ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν την απόδοσή της, η κατανάλωση ενέργειας, οι χρόνοι μετάβασης από τον έναν τρόπο λειτουργίας στον άλλον κλπ. [140,141]. Παρά τις δυσκολίες σχεδιασμού, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον ως προς τις επαναπροσδιοριζόμενες κεραίες λόγω των ελκυστικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Οι δυνατότητες πολλαπλών λειτουργιών τους, οι οποίες ρυθμίζονται εύκολα μέσω ειδικού λογισμικού, σε συνδυασμό με το μικρό τους μέγεθος, την απουσία απαιτήσεων για στοιχεία φιλτραρίσματος, την υψηλή απομόνωση κ.λπ. τις καθιστούν εξαιρετικούς υποψήφιους για μελλοντικές εφαρμογές [142].

Οι επαναπροσδιοριζόμενες κεραίες μπορούν να μεταβάλλουν τις συχνότητες συντονισμού τους, τα διαγράμματα ακτινοβολίας τους, την πόλωση τους ή οποιονδήποτε συνδυασμό των παραπάνω. Η μετάβασή τους από τη μια λειτουργία στην άλλη επιτυγχάνεται συνήθως με μία από τις ακόλουθες μεθόδους: ηλεκτρική εναλλαγή, οπτική εναλλαγή, μηχανική εναλλαγή ή μέσω έξυπνων υλικών. Η ηλεκτρική εναλλαγή της λειτουργίας της κεραίας αποτελεί την πιο συνηθισμένη μέθοδο. Περιλαμβάνει διόδους PIN (Positive-Intrinsic-Negative), διόδους varactor ή μικροηλεκτρομηχανικά RF συστήματα (RF MEMS, RF Microelectromechanical System). Η οπτική εναλλαγή αφορά τη χρήση φωτοαγωγίμων διακοπών, ενώ η μηχανική εναλλαγή περιλαμβάνει τη φυσική κίνηση των ακτινοβόλων στοιχείων [140,143]. Τέλος, τα έξυπνα υλικά τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους, όπως το γραφένιο, οι υγροί κρύσταλλοι, τα υγρά μέταλλα κλπ., μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για επαναπροσδιοριζόμενες κεραίες [144].

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με προσομοιώσεις επαναπροσδιοριζόμενων κεραιών [145]. Σε ορισμένες μελέτες η προτεινόμενη κεραία έχει επίσης υλοποιηθεί και στην πράξη. Οι συγγραφείς του άρθρου [146] προσομοίωσαν και υλοποίησαν μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία της οποίας το ακτινοβόλο στοιχείο είχε το σχήμα ενός λουλουδιού. Η προτεινόμενη κεραία λειτουργούσε στις ζώνες WLAN (Wireless Local-Area Network, Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο) και WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Μικροκυματική Πρόσβαση), και η εναλλαγή της συχνότητας συντονισμού βασίζονταν σε μία μόνο δίοδο varactor, για την οποία μελετήθηκαν διάφορες θέσεις πάνω στην κεραία. Μια κεραία όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο διόδοι PIN παρουσιάζεται στο άρθρο [147]. Η συγκεκριμένη κεραία κάλυπτε διάφορες συχνότητες στο εύρος από 3.1 έως 9.5 GHz, ενώ για διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας μεταβάλλονταν και το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία που υποστήριζε πολλαπλές συχνότητες σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στη μελέτη [148]. Τρεις διόδοι PIN οι οποίες τοποθετήθηκαν στο επίπεδο γείωσης αναλάμβαναν την εναλλαγή λειτουργίας της κεραίας για συχνότητες μεταξύ 1.36 και 8.6 GHz. Οι συγγραφείς του άρθρου [149] χρησιμοποίησαν έξι διόδους PIN σε μια κεραία pixel, επιτυγχάνοντας τρεις βασικούς τρόπους λειτουργίας με συχνότητες συντονισμού 2.6, 3.9 και 10 GHz. Μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία MIMO με χρήση διακοπών RF MEMS παρουσιάζεται στη μελέτη [150], με διάφορους

συντονισμούς από 800 MHz έως 5.5 GHz. Στο άρθρο [151], περιγράφεται μια κεραία επαναπροσδιοριζόμενη τόσο ως προς τη συχνότητα όσο και ως προς το διάγραμμα ακτινοβολίας της. Η συγκεκριμένη κεραία βασίστηκε σε μία μόνο δίοδο PIN η οποία παρείχε δύο τρόπους λειτουργίας, με συντονισμούς στα 2.47 και 5.36 GHz ή στα 3.8 GHz. Μια ακόμα επαναπροσδιοριζόμενη ως προς τη συχνότητα και το διάγραμμα ακτινοβολίας κεραία αποτέλεσε το αντικείμενο της μελέτης [152]. Βασιζόμενη σε τρεις διόδους PIN και σε ένα ακτινοβόλο στοιχείο δύο ανοιχτών δακτυλίων, η κεραία εμφάνιζε συντονισμούς μεταξύ των 1.9 και 5.6 GHz. Στο άρθρο [153] περιγράφεται μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία με τη δυνατότητα να περιστρέφει το διάγραμμα ακτινοβολίας της κατά $\pm 36^\circ$. Λειτουργούσε στη ζώνη των 5 GHz και η εναλλαγή κατάστασης του διαγράμματος ακτινοβολίας επιτυγχάνονταν μέσω ενός δικτύου τροφοδοσίας που χρησιμοποιούσε 16 διόδους PIN. Οι συγγραφείς του άρθρου [154] παρουσίασαν μια επαναπροσδιοριζόμενη ως προς την πόλωση κεραία που λειτουργούσε στην περιοχή μεταξύ 2 και 3 GHz. Μεταβάλλοντας τη χωρητικότητα τεσσάρων διόδων varactor μέσω μιας τάσης μικρότερη των 7.5 V, η πόλωση μεταβάλλονταν μεταξύ δεξιόστροφης, αριστερόστροφης, οριζόντιας και κατακόρυφης. Μια ακόμα επαναπροσδιοριζόμενη ως προς την πόλωση κεραία παρουσιάζεται στο άρθρο [155]. Σε αυτήν την περίπτωση η κεραία ήταν κατάλληλη για εφαρμογές 5G στην περιοχή των 3.5 GHz, και μπορούσε να εναλλάσσεται μεταξύ δεξιόστροφης και αριστερόστροφης πόλωσης, με τη βοήθεια δύο διόδων PIN. Στα πλαίσια της μελέτης [156], για την εναλλαγή της πόλωσης μιας κεραίας μεταξύ γραμμικής και κυκλικής, χρησιμοποιήθηκε ένα υλικό αλλαγής φάσης, το Τελλουρίδιο του Γερμανίου (GeTe). Η κεραία λειτουργούσε στην περιοχή των 30 GHz. Με την ακτινοβολία βραχέων παλμών λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας (UV, Ultraviolet), το υλικό εναλλάσσεται μεταξύ μιας μονωτικής (OFF) και μιας μεταλλικής (ON) κατάστασης. Τέλος, στο άρθρο [157] παρουσιάζεται μια επαναπροσδιοριζόμενη ως προς τη συχνότητα κεραία για εφαρμογές γνωστικών ραδιοσυστημάτων. Η συγκεκριμένη κεραία λειτουργούσε σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 2.63 και 3.7 GHz. Για την εναλλαγή της κεραίας μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών της χρησιμοποιήθηκαν 12 διόδοι PIN στο επίπεδο γείωσης.

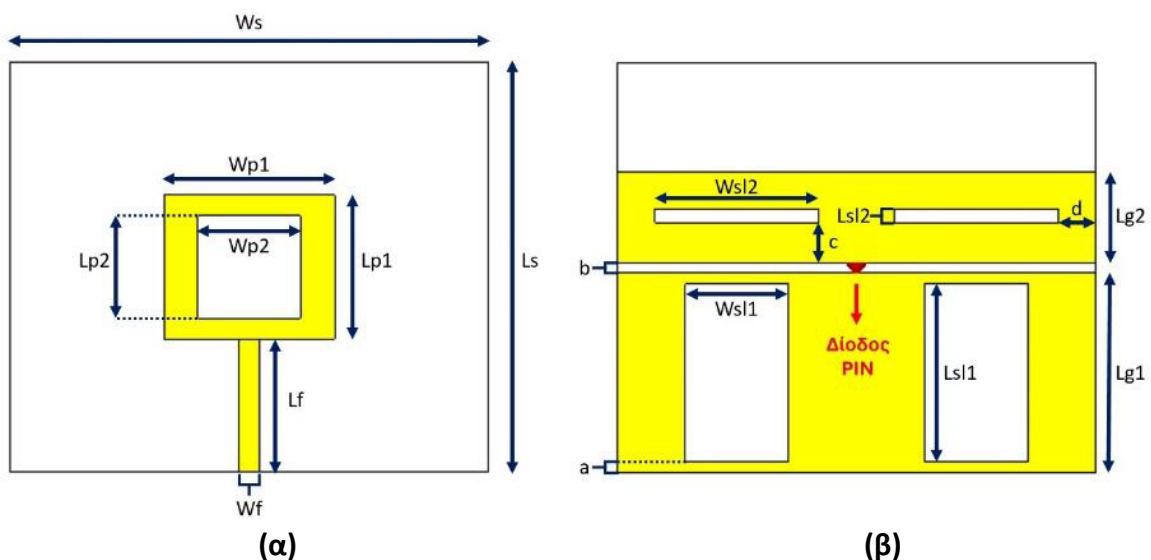
4.4 Υλοποίηση της κεραίας

Το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα των επαναπροσδιοριζόμενων κεραιών που βασίζονται σε διόδους PIN, αφορά κυρίως κεραίες με τουλάχιστον δύο διόδους [147,149,152,155,157–163]. Από την άλλη μεριά, οι δημοσιευμένες μελέτες που αφορούν επαναπροσδιοριζόμενες κεραίες με μία μόνο δίοδο PIN είναι λίγες [163–165]. Η κεραία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και περιγράφεται στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου προσφέρει τρεις βασικούς τρόπους λειτουργίας. Οι κύριοι συντονισμοί για κάθε τρόπο λειτουργίας της υλοποιημένης κεραίας βρέθηκαν σε συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Στην περιοχή αυτή απαντώνται πολλά πρωτόκολλα ασύρματων επικοινωνιών, όπως 5G NR (5th Generation New Radio), WiFi 6E, LTE κλπ. Η κεραία βασίζεται σε μία μόνο δίοδο PIN, κάτι που διευκολύνει την υλοποίησή της,

καθώς και τη μετάβαση από τη μια λειτουργία της στην άλλη, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί το κόστος της. Επιπλέον, για τη μετάβαση από τη μια λειτουργία στην άλλη απαιτείται στα άκρα της διόδου η εφαρμογή μικρής τάσης, η οποία δεν ξεπερνά τα 0.9 V. Για την υλοποιημένη κεραία ο λόγος στάσιμου κύματος (VSWR) δεν ξεπερνά το 1.02, η παράμετρος S11 είναι σε κάθε συντονισμό μικρότερη των -40 dB, και το εύρος ζώνης συνολικά για τους τρεις βασικούς συντονισμούς είναι κοντά στο 1 GHz.

4.4.1 Η γεωμετρία της κεραίας

Η δομική γεωμετρία της κεραίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Η κεραία τυπώθηκε πάνω σε υποστρώμα FR4 διηλεκτρικής σταθεράς 4.3 και πάχους 1.5 mm. Το υλικό των μεταλλικών στοιχείων της κεραίας είναι χαλκός, το πάχος του οποίου είναι 35 μm . Το ακτινοβόλο στοιχείο έχει το σχήμα ενός ορθογώνιου δακτυλίου, και η είσοδος σήματος στην κεραία γίνεται μέσω μιας μικροταινίας. Το επίπεδο της γείωσης, στην πίσω πλευρά της κεραίας, αποτελείται από δύο ορθογώνια τμήματα και η διόδος PIN τοποθετήθηκε στο κέντρο μεταξύ αυτών, με την άνοδό της να βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα. Τέσσερις ορθογώνιες οπές εισήχθησαν επίσης στο επίπεδο της γείωσης, σε σημεία όπου δευτερεύοντες ανεπιθύμητοι συντονισμοί εμφάνιζαν μέγιστα επιφανειακά ρεύματα, ελαττώνοντας ή καταργώντας τους με τον τρόπο αυτόν. Τέτοιες μορφές γείωσης είναι γνωστές ως παραμορφωμένες δομές γείωσης (DGS, Defected Ground Structure). Οι διαστάσεις των οπών, καθώς και εκείνες του ακτινοβόλου στοιχείου, του υποστρώματος και του επιπέδου της γείωσης, προσαρμόστηκαν για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Η τελική τιμή για κάθε παράμετρο σχεδιασμού της κεραίας περιλαμβάνεται στον Πίνακα 4.1.



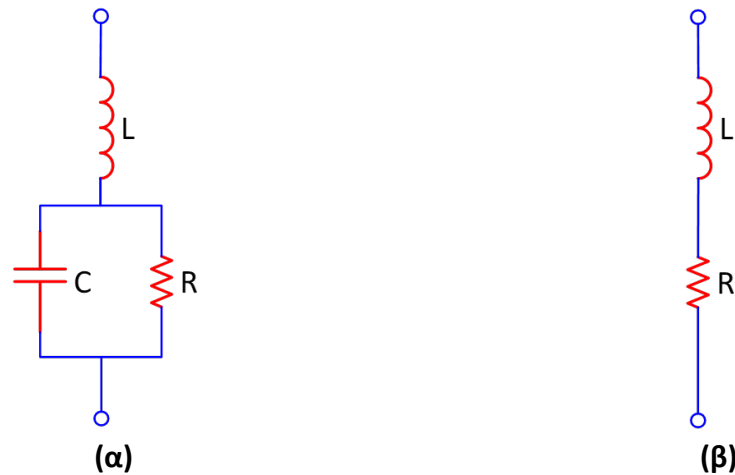
Σχήμα 4.2: Η γεωμετρία της κεραίας: (α) μπροστά όψη και (β) πίσω όψη.

Πίνακας 4.1: Οι τιμές των παραμέτρων σχεδίασης της κεραίας.

Παράμετρος Σχεδίασης	Διαστάσεις (mm)	Παράμετρος Σχεδίασης	Διαστάσεις (mm)
Ws	70	Lsl1	26
Ls	60	Wsl2	24
Wp1	25	Lsl2	2
Lp1	21	Lg1	29.35
Wp2	15	Lg2	13.35
Lp2	15	a	1.675
Wf	3	b	1.3
Lf	19.5	c	5.68
Wsl1	15	d	5.5

4.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων της κεραίας

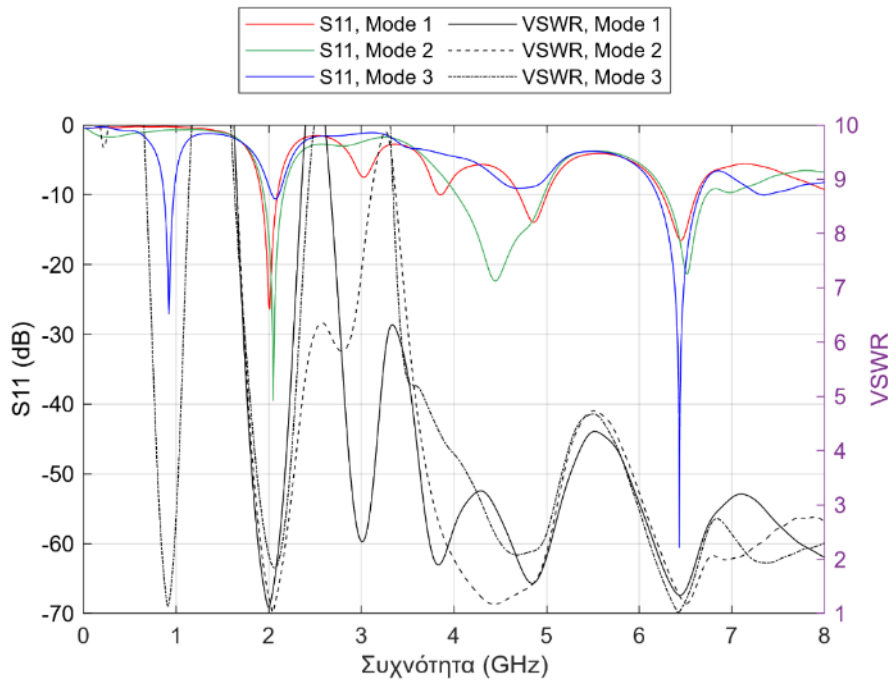
Η προσομοίωση της κεραίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του CST Studio Suite 2019 με συνοριακές συνθήκες ανοικτού χώρου. Για την είσοδο σήματος μια θύρα κυματοδηγού τοποθετήθηκε στην άκρη της μικροταινίας της κεραίας, με συντελεστή επέκτασης θύρας ίσο με 7.2. Για το υλικό του υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε FR4 με απώλειες. Για τα διάφορα κομμάτια χαλκού τα οποία προστέθηκαν πάνω στο υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε ανοπτημένος χαλκός. Το μοντέλο της διόδου PIN που χρησιμοποιήθηκε είναι το Skyworks SMP1302 σε συσκευασία SC-79. Σύμφωνα με τα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών της διόδου [166], αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές από ελάχιστη συχνότητα 10 MHz έως και μέγιστη συχνότητα πέραν των 10 GHz. Στην προσομοίωση της κεραίας, η διάδος έπρεπε να αναπαρασταθεί με το ισοδύναμο κύκλωμά της, επειδή το εργαλείο προσομοίωσης δεν διαθέτει τη δυνατότητα προσομοίωσης μη γραμμικών στοιχείων. Στο ισοδύναμο κύκλωμά της, μια διάδος PIN μπορεί να αναπαρασταθεί είτε από ένα κύκλωμα RL όταν είναι ορθά πολωμένη (κατάσταση ON) είτε από ένα κύκλωμα RLC όταν είναι ανάστροφα πολωμένη (κατάσταση OFF). Το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου για τις δύο αυτές περιπτώσεις πόλωσης της φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στην περίπτωση της ορθής πόλωσης, η διάδος λειτουργεί ως μια αντίσταση ελεγχόμενη από ρεύμα, ενώ στην περίπτωση της ανάστροφης πόλωσης λειτουργεί ως πυκνωτής ο οποίος είναι συνδεδεμένος παράλληλα με μια αντίσταση υψηλής τιμής. Η επαγωγή στο κύκλωμα αυτό εξαρτάται από τη συσκευασία που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 4.3: Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου PIN όταν είναι **(α)** ανάστροφα πολωμένη και **(β)** ορθά πολωμένη.

Μια διάδος PIN διαφέρει από μια απλή διάοδο p-n ως προς τη δομή και τις λειτουργικές της ικανότητες. Ενώ μια απλή διάοδο αποτελείται μόνο από υλικά τύπου p και n, μια διάodos PIN περιλαμβάνει ένα επιπλέον στρώμα ενδογενούς (μη ντοπαρισμένου) υλικού μεταξύ των περιοχών τύπου p και n. Αυτό το ενδογενές στρώμα προκαλεί τη δημιουργία μιας ευρείας περιοχής απογύμνωσης, επειδή δεν περιέχει ελεύθερους φορείς φορτίου όπως τα ντοπαρισμένα στρώματα. Η ευρεία αυτή περιοχή απογύμνωσης βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της διόδου σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων και υψηλής ισχύος, καθώς της επιτρέπει να αντέχει υψηλότερες ανάστροφες τάσεις και να ελαχιστοποιεί την χωρητικότητα της επαφής p-n. Αυτό καθιστά την διάοδο PIN πιο αποδοτική στη χρήση της ως διακόπτης και στην απόσβεση σημάτων σε κυκλώματα RF και μικροκυμάτων. Σε αντίθεση με τις απλές διόδους, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως ως ανορθωτές, οι διόδους PIN διαπρέπουν σε ρόλους που απαιτούν ελεγχόμενη αντίσταση και μεταβλητή χωρητικότητα, όπως διακόπτες RF, φωτοανιχνευτές και μετατοπιστές φάσης, χάρη στις μοναδικές δομικές τους ιδιότητες.

Στην προσομοίωση της κεραίας, οι τιμές της αντίστασης (R) και της χωρητικότητας (C) του ισοδύναμου κυκλώματος της διόδου PIN επιλέχθηκαν από τα γραφήματα των φύλλων τεχνικών προδιαγραφών της, θεωρώντας ότι η τάση στη διάοδο κυμαίνεται μεταξύ 0 και 900 mV. Το L επιλέγεται πάντα ως 0.7 nH, όπως ορίζεται για τη συσκευασία της διόδου που είναι SC-79. Οι προσομοιώσεις αφορούσαν ολόκληρο το εύρος από 0 έως και 900 mV, το οποίο αντιστοιχεί σε τιμές του R που κυμαίνονται από 1 έως 1000 Ω υπό συνθήκες ορθής πόλωσης. Ειδικότερα, ξεχώρισαν τρεις διαφορετικές λειτουργίες, οι οποίες διακρίνονται από τις εμφανώς χαμηλές τιμές της παραμέτρου S11 που παρατηρήθηκαν στις κύριες συχνότητες συντονισμού τους. Οι περιπτώσεις αυτές χαρακτηρίζονται ως mode 1, 2 και 3. Το mode 1 αντιστοιχεί σε τάση 0 στη διάοδο, με τιμές C = 0.3 pF και R = 5 kΩ. Τα modes 2 και 3 αντιστοιχούν σε ορθή πόλωση της διόδου, χωρίς C, και με R = 160 Ω ή R = 4 Ω αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της παραμέτρου S11 και του VSWR για αυτούς τους τρεις τρόπους λειτουργίας της κεραίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4.

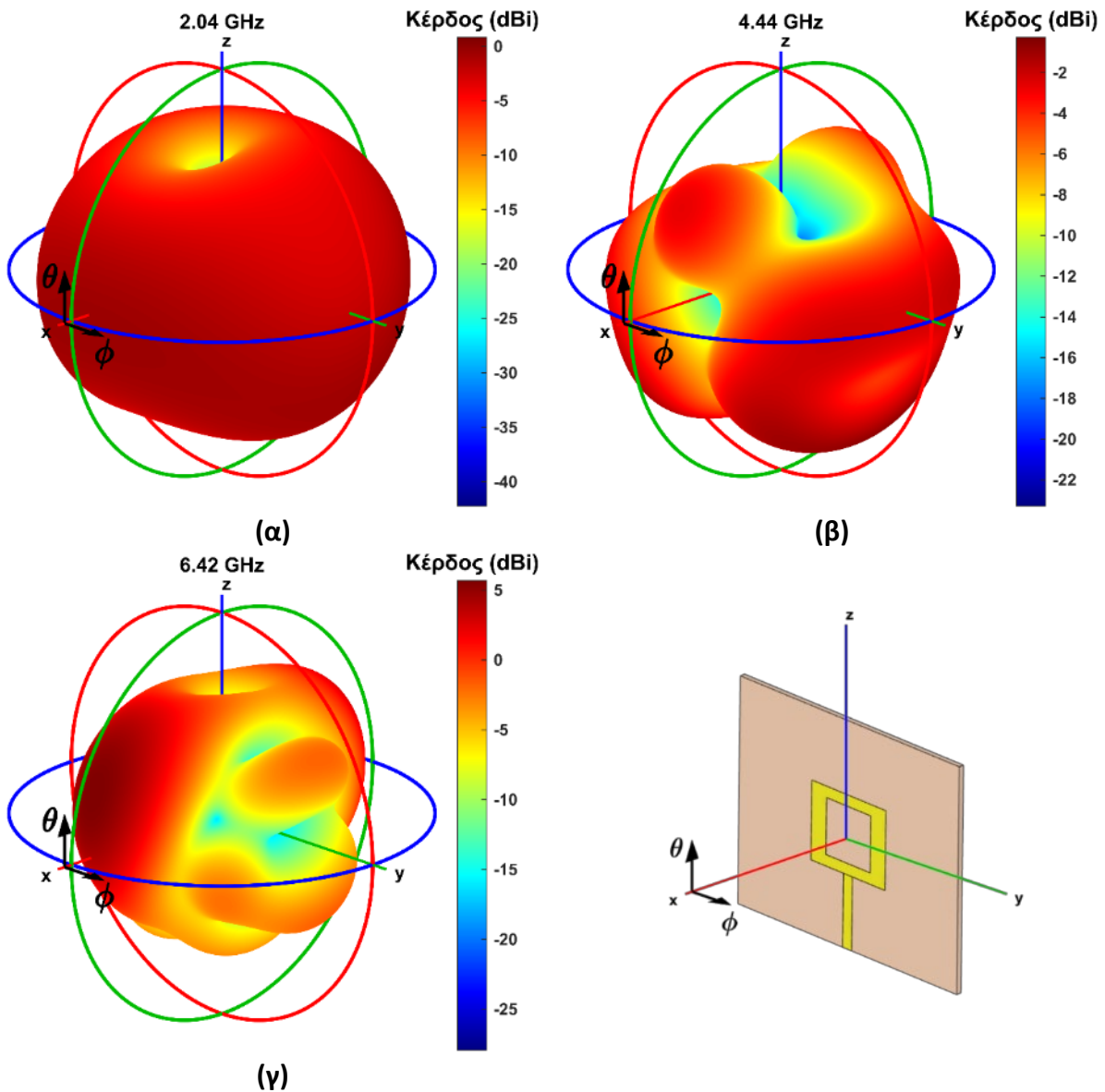


Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα της παραμέτρου S11 και του VSWR για τους τρεις τρόπους λειτουργίας της κεραίας όπως προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.4, η κύρια συχνότητα συντονισμού για το mode 1 είναι τα 2 GHz, με την παράμετρο S11 να είναι -26.4 dB, μια τιμή η οποία είναι περίπου 9.5 dB χαμηλότερη από τον επόμενο, δευτερεύων, συντονισμό που παρατηρείται στα 6.4 GHz. Το VSWR του συντονισμού των 2 GHz για αυτόν τον τρόπο λειτουργίας είναι ίσο με 1.11. Στη συνέχεια, το mode 2 παρουσιάζει καλύτερο κύριο συντονισμό στη συχνότητα 2.04 GHz από ότι το mode 1 στην περιοχή των 2 GHz. Χαρακτηρίζεται από καλή τιμή S11, -39.5 dB, και VSWR ίσο με 1.02. Μεταξύ των τριών τρόπων λειτουργίας, αυτός έχει τον καλύτερο συντονισμό στη ζώνη των 4 GHz, συγκεκριμένα στα 4.44 GHz. Η παράμετρος S11 για αυτόν τον συντονισμό είναι -22.3 dB και το VSWR είναι 1.17. Τέλος, ο κύριος συντονισμός του mode 3 βρίσκεται στα 6.42 GHz, με εξαιρετική τιμή της παραμέτρου S11 ίση με -60.6 dB, σε συνδυασμό με ένα πολύ χαμηλό VSWR που βρέθηκε ίσο 1.01 για αυτήν τη συχνότητα συντονισμού. Ο επόμενος, δευτερεύων, συντονισμός παρατηρείται στα 0.91 GHz, με την παράμετρο S11 να είναι περίπου 33.5 dB υψηλότερη από εκείνη του κύριου συντονισμού.

Συνολικά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η κεραία μπορεί να λειτουργήσει στην περιοχή των 2, 4 και 6 GHz. Το mode 2 αποτελεί το καταλληλότερο για λειτουργία στις ζώνες των 2 και 4 GHz, συγκεκριμένα σε συχνότητες 2.04 και 4.44 GHz. Αντίστοιχα, το mode 3 είναι το πιο ιδανικό για λειτουργία στη ζώνη των 6 GHz, συγκεκριμένα στα 6.42 GHz. Το εύρος ζώνης, ορισμένο στην τιμή των -10 dB, για τις συχνότητες 2.04, 4.44 και 6.42 GHz είναι 211, 941 και 452 MHz αντίστοιχα. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας για αυτές τις τρεις περιπτώσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 4.5, όπου ο θετικός άξονας x εκτείνεται προς την εμπρόσθια κατεύθυνση της κεραίας. Η αζιμουθιακή γωνία θα αναφέρεται ως ϕ , ενώ η

γωνία ανύψωσης ως θ . Και οι δύο είναι 0° στο μπροστινό μέρος της κεραίας, ενώ 180° στο πίσω μέρος αυτής.



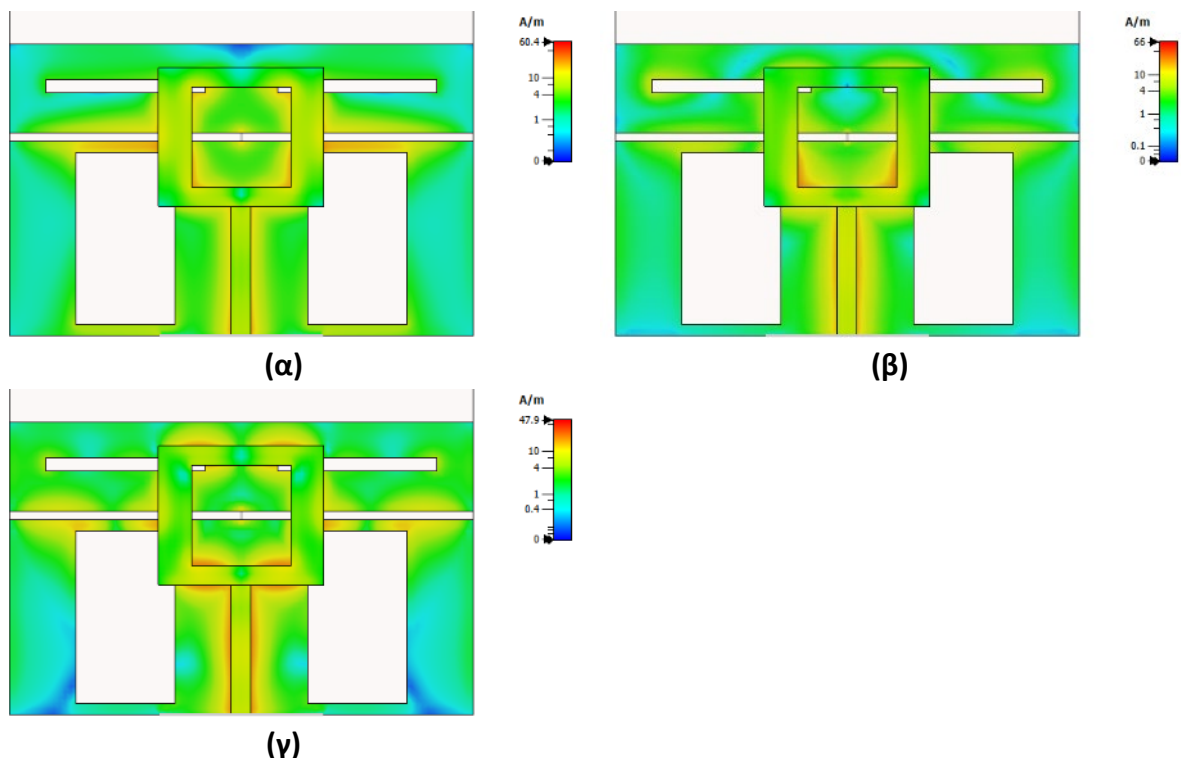
Σχήμα 4.5: Τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας όπως προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων για τις συχνότητες **(α)** 2.04 GHz, **(β)** 4.44 GHz και **(γ)** 6.42 GHz.

Σύμφωνα με το διάγραμμα ακτινοβολίας της συχνότητας 2.04 GHz, το μέγιστο κέρδος της κεραίας είναι, σε αυτή την περίπτωση, 0.82 dBi, και παρατηρείται στις γωνίες $\theta = 355^\circ$ και $\phi = 180^\circ$. Επιπλέον, μπροστά από την κεραία, για $\theta = \phi = 0^\circ$, το κέρδος είναι -0.78 dBi. Ομοίως, το διάγραμμα ακτινοβολίας των 4.44 GHz παρουσιάζει μέγιστο κέρδος -0.31 dBi, στις γωνίες $\theta = 310^\circ$ και $\phi = 135^\circ$. Μπροστά από την κεραία, σε $\theta = \phi = 0^\circ$, το κέρδος είναι -15.74 dBi. Ωστόσο, το κέρδος όταν $\phi = 0^\circ$, μπορεί να αυξηθεί στα -3.78 dBi με την περιστροφή της κεραίας σε γωνία $\theta = 34^\circ$ στο επίπεδο ανύψωσης. Τέλος, το διάγραμμα ακτινοβολίας για τα

6.42 GHz παρουσιάζει μέγιστο κέρδος 5.68 dBi, σε γωνίες $\theta = 20^\circ$ και $\phi = 0^\circ$, ενώ σε γωνίες $\theta = \phi = 0^\circ$, ισούται με 4.13 dBi.

Όπως προκύπτει συνολικά από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η κεραία αποδίδει καλύτερα όταν λειτουργεί στο mode 3, με κύριο συντονισμό στα 6.42 GHz. Σε αυτήν της την κατάσταση παρουσιάζει το μέγιστο κέρδος καθώς και τις χαμηλότερες τιμές για την παράμετρο S11 και κατ' επέκταση για το VSWR.

Το Σχήμα 4.6 περιλαμβάνει μια οπτική αναπαράσταση της κατανομής των επιφανειακών ρευμάτων στην κεραία για τις τρεις κύριες συχνότητες συντονισμού της: 2.04, 4.44 και 6.42 GHz. Είναι προφανές από το σχήμα ότι, εκτός από το ακτινοβόλο στοιχείο, το επίπεδο γείωσης επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας. Αν και το ρεύμα κατανέμεται σε ολόκληρη την επιφάνεια της κεραίας, υπάρχει μια έντονη συγκέντρωση πίσω από το ακτινοβόλο στοιχείο. Επιπλέον, και στις τρεις περιπτώσεις, σημαντική συνεισφορά στην ακτινοβολία της κεραίας προέρχεται από την άκρη των δύο τμημάτων του επιπέδου γείωσης, τα οποία συνδέονται μέσω της διόδου PIN. Υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στην κατανομή του επιφανειακού ρεύματος για κάθε συχνότητα. Αυτές οι διαφοροποιήσεις στην κατανομή των επιφανειακών ρευμάτων μεταφράζονται σε διακριτές διαφορές στα διαγράμματα ακτινοβολίας μεταξύ των τριών συχνοτήτων, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.6: Κατανομή των επιφανειακών ρευμάτων της κεραίας όπως προέκυψε μέσω προσομοιώσεων για τις συχνότητες **(α)** 2.04 GHz, **(β)** 4.44 GHz και **(γ)** 6.42 GHz.

Τέλος, οι προσομοιώσεις επιδεικνύουν μια καλή απόδοση ακτινοβολίας για την κεραία στους τρεις βασικούς συντονισμούς της. Για τη συχνότητα των 2.04 GHz, η απόδοση ακτινοβολίας είναι υψηλή, 74%, ενώ για τις συχνότητες 4.44 GHz και 6.42 GHz, η απόδοση ακτινοβολίας είναι 59% και 54% αντίστοιχα. Γενικά, μια κεραία θεωρείται πως έχει καλή απόδοση ακτινοβολίας όταν ακτινοβολεί τουλάχιστον το 50-60% της ενέργειας που εισάγεται σε αυτήν [167].

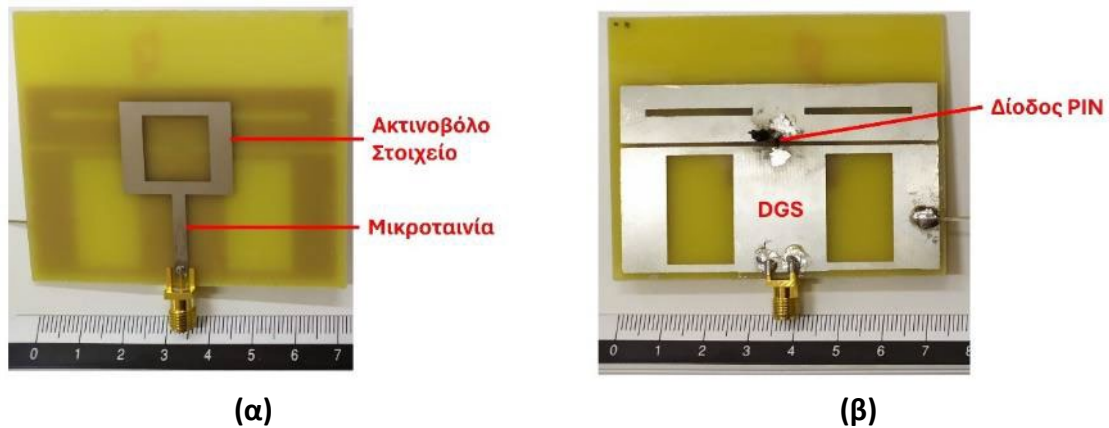
Συνολικά, μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της κεραίας για τους τρεις βασικούς συντονισμούς της περιλαμβάνεται στον Πίνακα 4.2. Η σύνοψη αυτή περιλαμβάνει για τις βασικές συχνότητες συντονισμού, τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου S11, του VSWR, του εύρους ζώνης ορισμένου στα -10 dB, το μέγιστο κέρδος της κεραίας, καθώς και τις γωνίες όπου παρατηρείται το μέγιστο κέρδος.

Πίνακας 4.2: Σύνοψη των αποτελεσμάτων προσομοίωσης της κεραίας για τους τρεις βασικούς συντονισμούς στην περιοχή των 2, 4 και 6 GHz.

Συχνότητα (GHz)	S11 (dB)	VSWR	Εύρος Ζώνης (MHz) Ορισμένο στα -10 dB	Μέγιστο Κέρδος (dBi)	Γωνίες Μέγιστου Κέρδους
2.04	-39.5	1.02	211	0.82	$\phi = 180^\circ$, $\theta = 355^\circ$
4.44	-22.3	1.17	941	-0.31	$\phi = 135^\circ$, $\theta = 310^\circ$
6.42	-60.6	1.01	452	5.68	$\phi = 0^\circ$, $\theta = 22^\circ$

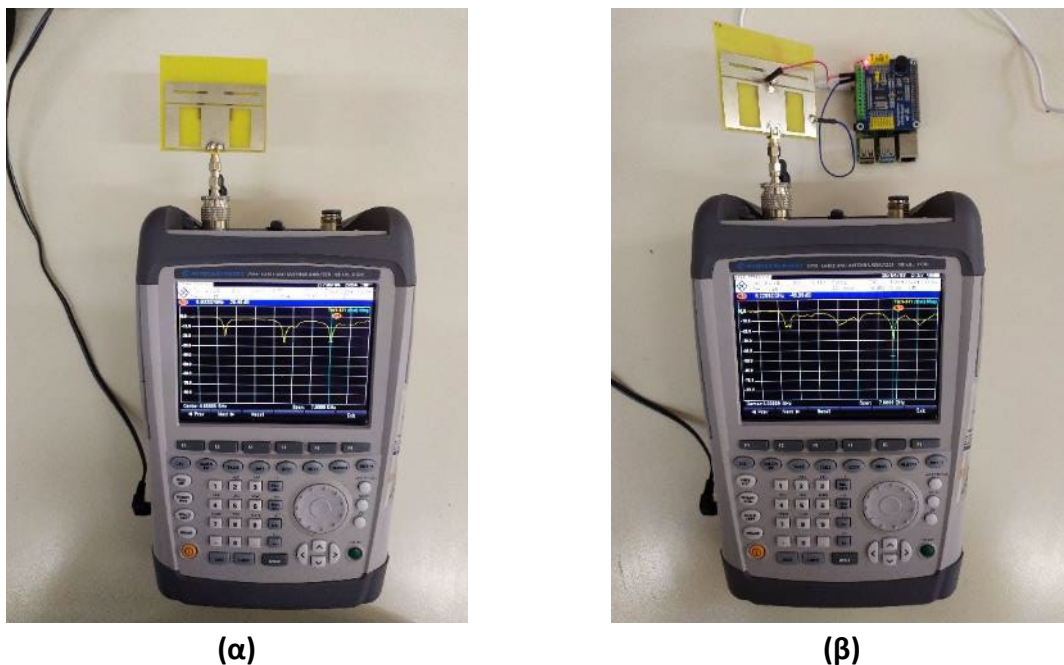
4.4.3 Αποτελέσματα μετρήσεων της υλοποιημένης κεραίας

Η μπροστά και η πίσω πλευρά της επαναπροσδιοριζόμενης κεραίας μικροταινίας, όπως αυτή υλοποιήθηκε, φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Για την παροχή της απαραίτητης τάσης στη δίοδο PIN κολλήθηκαν δύο ακίδες, μια ακριβώς δίπλα από την άνοδο της διόδου, και μια στο πλάι του κατώτερου τμήματος της γείωσης της κεραίας. Μεταβάλλοντας την τάση που εφαρμόζεται στη δίοδο προέκυψαν τρεις βασικοί συντονισμοί στην περιοχή των 2, 4 και 6 GHz, αντίστοιχα και με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, ο τρόπος λειτουργίας όπου η κεραία παρουσιάζει την καλύτερη αποδοτικότητα για την περιοχή των 2 GHz θα αναφέρεται ως mode 1, ενώ για την περιοχή των 4 και των 6 GHz οι σχετικοί τρόποι λειτουργίας θα αναφέρονται αντίστοιχα ως mode 2 και mode 3. Οι τρεις αυτοί τρόποι λειτουργίας αντιστοιχούν σε τάση στα άκρα της διόδου ίση με 0, 550 και 740 mV αντίστοιχα. Για την παροχή αυτής της τάσης χρησιμοποιήθηκε ο DAC8552, ο οποίος χρησιμοποιείται τόσο στο σύστημα του πομπού όσο και σε εκείνο του δέκτη όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Ο συγκεκριμένος DAC προσφέρει υψηλή σταθερότητα στην παροχή τάσης, χωρίς σημαντικές συνιστώσες AC. Παράλληλα τα κανάλια του DAC διαθέτουν υψηλή απομόνωση ως προς σήματα AC.



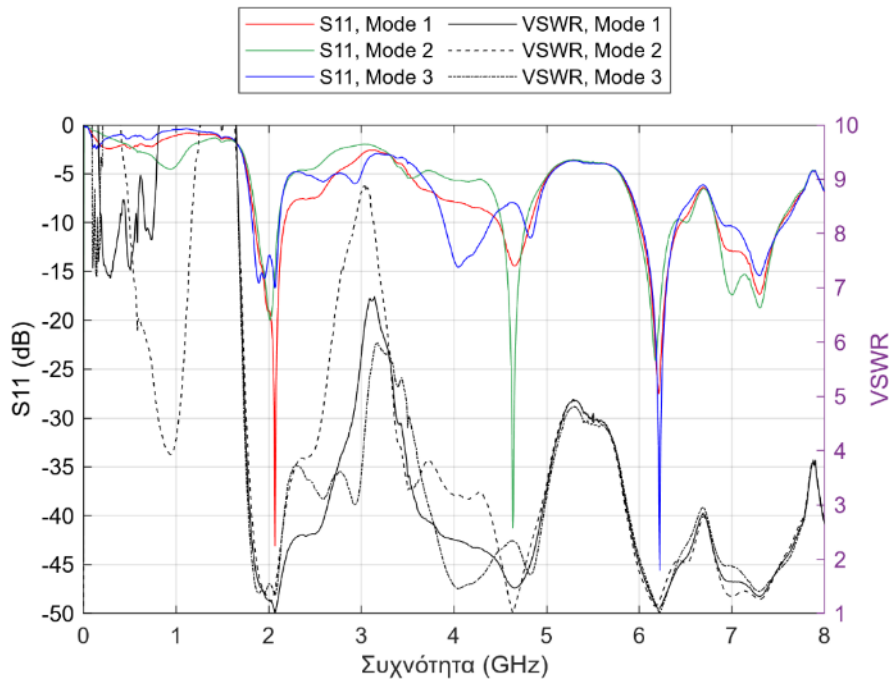
Σχήμα 4.7: Η υλοποιημένη κεραία: **(α)** μπροστά όψη και **(β)** πίσω όψη.

Ένας φορητός VNA (Vector Network Analyzer, Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου), ο Rohde & Schwarz ZVH8, χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης της κεραίας μέσω της μέτρησης της παραμέτρου S_{11} και του VSWR. Στο Σχήμα 4.8α παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο μετρήσεων της παραμέτρου S_{11} της κεραίας πριν από την εισαγωγή της διόδου PIN, ενώ στο Σχήμα 4.8β παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο για την τελική μορφή της κεραίας, και όταν αυτή λειτουργεί υπό το mode 3. Για τη μετάβαση από τη μια λειτουργία στην άλλη ρυθμίζονταν η τάση στα άκρα της διόδου μέσω ενός Raspberry Pi 4 το οποίο ελέγχονταν εξ αποστάσεως.



Σχήμα 4.8: Η διάταξη για τη μέτρηση της παραμέτρου S_{11} και του VSWR της κεραίας **(α)** πριν την εισαγωγή της διόδου PIN και **(β)** μετά την εισαγωγή της διόδου PIN, με την κεραία να λειτουργεί υπό το mode 3.

Τα πειραματικά αποτελέσματα για την παράμετρο S11 και για το VSWR φαίνονται στο Σχήμα 4.9.

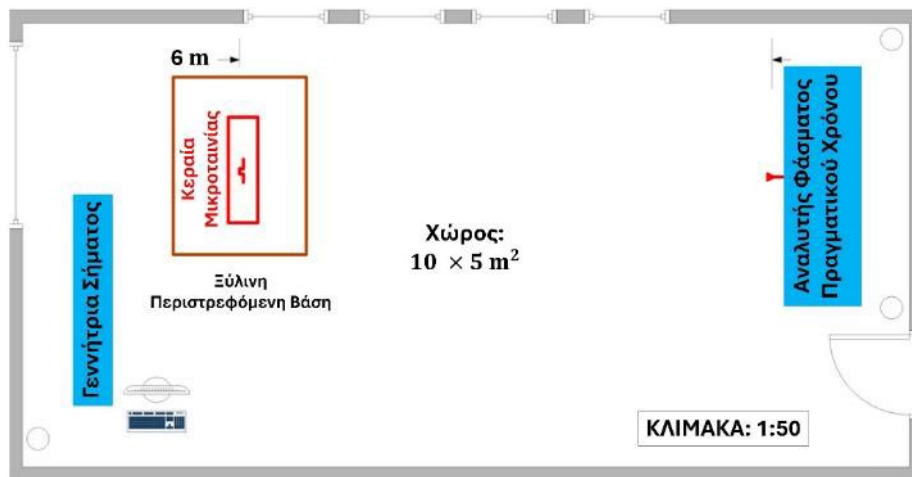


Σχήμα 4.9: Πειραματικά αποτελέσματα της παραμέτρου S11 και του VSWR της κεραίας για τους τρεις τρόπους λειτουργίας της.

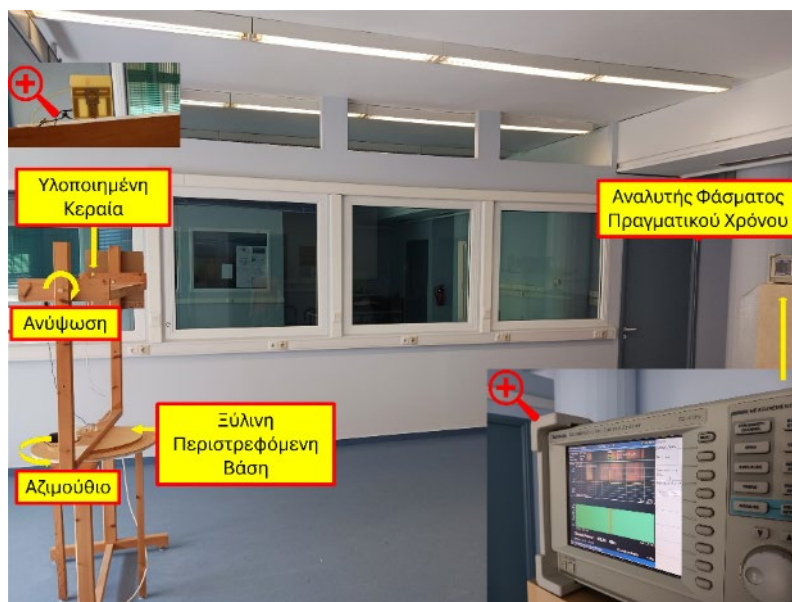
Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 4.9, η κεραία παρουσιάζει τρεις πολύ καλούς συντονισμούς στις περιοχές των 2, 4 και 6 GHz. Και στις τρεις περιπτώσεις η τιμή της παραμέτρου S11 είναι αρκετά κάτω από τα -40 dB, ενώ το VSWR δεν ξεπερνά την τιμή 1.02. Πιο συγκεκριμένα, ο βασικός συντονισμός για το mode 1 βρίσκεται στα 2.07 GHz, με την παράμετρο S11 να ισούται με -43.1 dB, μια τιμή που είναι 15.6 dB χαμηλότερη από την παράμετρο S11 ενός δευτερεύοντος συντονισμού που παρατηρείται στα 6.21 GHz. Το VSWR στον συντονισμό των 2.07 GHz είναι 1.01 και το εύρος ζώνης ορισμένο στο ύψος των -10 dB είναι 327 MHz. Όσον αφορά το mode 2, παρουσιάζει έναν κύριο συντονισμό στα 4.63 GHz. Η αντίστοιχη παράμετρος S11 είναι -41.3 dB, μια τιμή χαμηλότερη κατά 17.1 dB από εκείνη ενός δευτερεύοντος συντονισμού στα 6.17 GHz. Η τιμή του VSWR σε αυτήν την περίπτωση είναι 1.02 και το εύρος ζώνης ορισμένο στο ύψος των -10 dB είναι 260 MHz. Τέλος, για το mode 3, ο κύριος συντονισμός εντοπίζεται στα 6.22 GHz και η παράμετρος S11 είναι -45.6 dB, δηλαδή 28.9 dB χαμηλότερη από εκείνη ενός δευτερεύοντος συντονισμού που εντοπίζεται στα 2.07 GHz. Το VSWR του συντονισμού στα 6.22 GHz είναι 1.01, ενώ το εύρος ζώνης που ορίζεται στο ύψος των -10 dB βρίσκεται στα 387 MHz.

Οι μετρήσεις του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας πραγματοποιήθηκαν σε ένα εργαστηριακό περιβάλλον ελεύθερου χώρου με διαστάσεις 5 m πλάτος και 10 m μήκος. Το σχηματικό διάγραμμα του συγκεκριμένου χώρου φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Κατά τις μετρήσεις του διαγράμματος ακτινοβολίας η κεραία τοποθετήθηκε στην κορυφή μιας ξύλινης

περιστρεφόμενης βάσης, σε ύψος 1.5 m από το έδαφος. Σε μια απόσταση 6 m βρίσκονταν ένας αναλυτής φάσματος πραγματικού χρόνου, ο Tektronix RS3408A. Για την είσοδο σήματος στην υλοποιημένη κεραία χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια μη διαμορφωμένου σήματος, η οποία μπορούσε να καλύψει τις τρεις συχνότητες των τριών βασικών συντονισμών της κεραίας. Οι μετρήσεις έγιναν για κάθε έναν από τους τρεις τρόπους λειτουργίας με ανάλυση βήματος 10 μοιρών και για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων επαναλήφθηκαν πέντε φορές και υπολογίστηκε η μέση τιμή για κάθε γωνία. Το Σχήμα 4.11 περιλαμβάνει μια φωτογραφία της διάταξης και του χώρου των μετρήσεων.



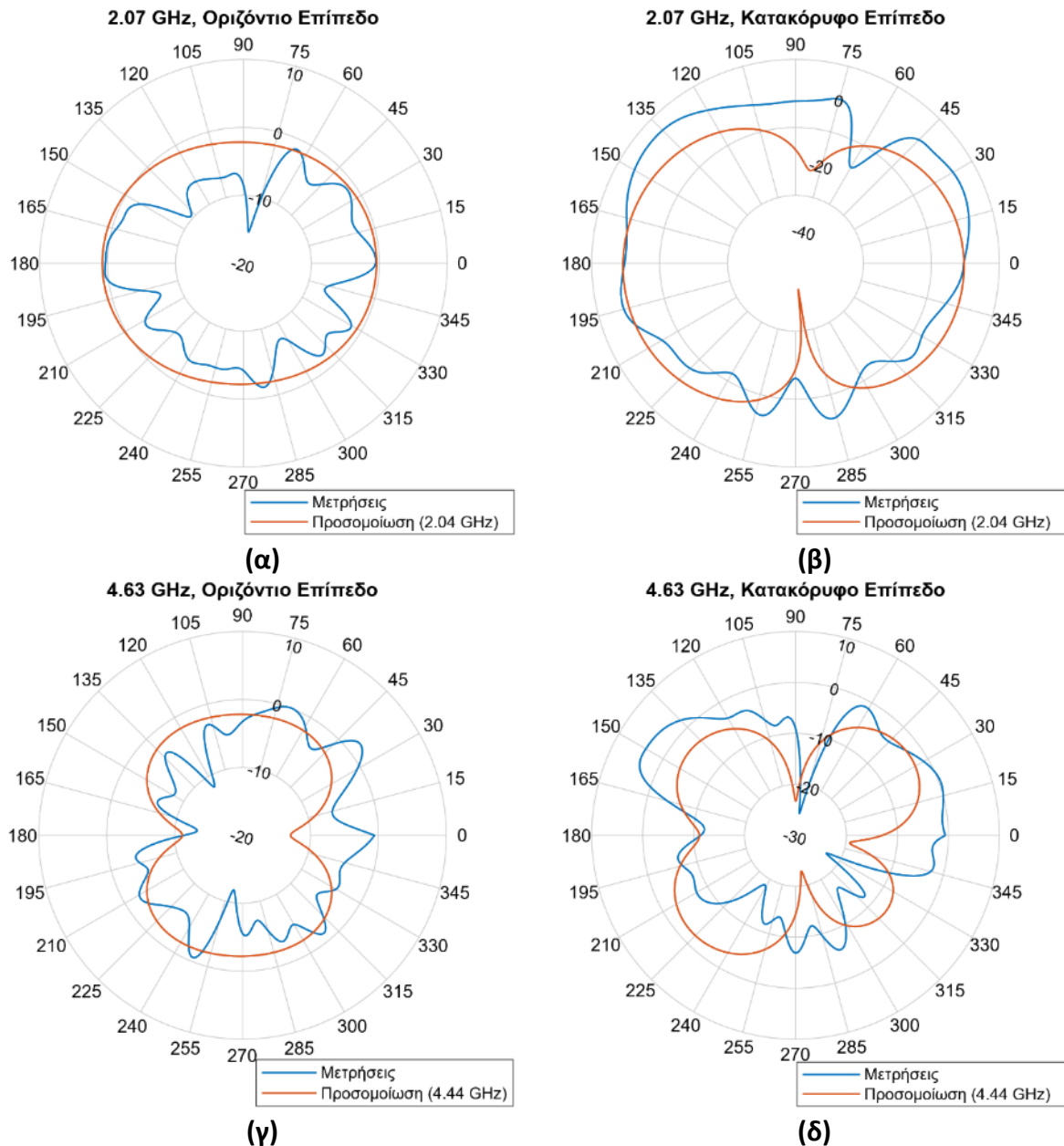
Σχήμα 4.10: Σχηματικό διάγραμμα του χώρου όπου έγιναν οι μετρήσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της κεραίας.



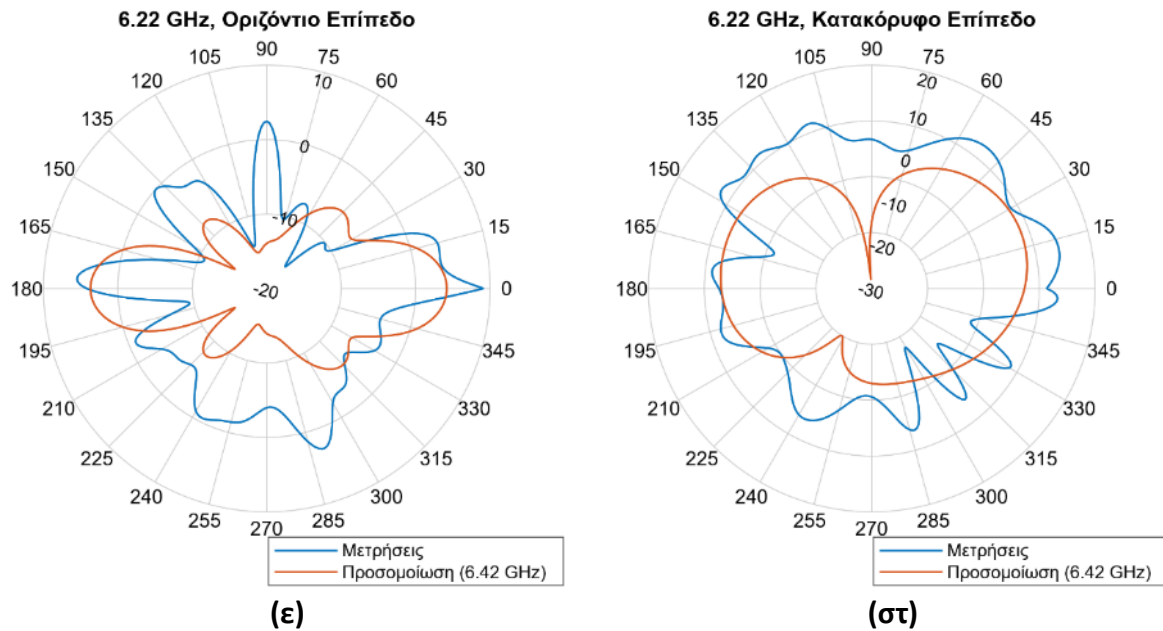
Σχήμα 4.11: Φωτογραφία της διάταξης και του χώρου όπου έγιναν οι μετρήσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της κεραίας.

Κεφάλαιο 4: Υλοποίηση Επαναπροσδιοριζόμενης Κεραίας για το Σύστημα του Δέκτη

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.12 απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας τόσο στο αζιμουθιακό επίπεδο όσο και στο επίπεδο ανύψωσης, για τους τρεις βασικούς συντονισμούς που προκύπτουν από τα modes 1, 2 και 3 στις συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Όπως προηγουμένως, η αζιμουθιακή γωνία θα αναφέρεται ως ϕ , ενώ η γωνία ανύψωσης ως θ . Επιπλέον, στο Σχήμα 4.12 περιλαμβάνονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα όπως προέκυψαν από την προσομοίωση στους αντίστοιχους κύριους συντονισμούς των 2.04, 4.44 και 6.42 GHz.



Σχήμα 4.12: Διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας στο αζιμουθιακό (αριστερά) και το κατακόρυφο επίπεδο (δεξιά) όπως προέκυψαν μέσω μετρήσεων (μπλε χρώμα) για τις συχνότητες (α, β) 2.07 GHz, (γ, δ) 4.63 GHz και (ε, στ) 6.22 GHz, και μέσω προσομοιώσεων (κόκκινο χρώμα) για τις συχνότητες (α, β) 2.04 GHz, (γ, δ) 4.44 GHz και (ε, στ) 6.42 GHz.



Σχήμα 4.12 (Συνέχεια).

Σύμφωνα με τα διάγραμμα ακτινοβολίας της συχνότητας των 2.07 GHz, το κέρδος της κεραίας στο αζιμουθιακό επίπεδο, για γωνία ανύψωσης $\theta = 0^\circ$, έχει μέγιστη τιμή 0.45 dBi, για αζιμουθιακή γωνία $\phi = 176^\circ$, στο πίσω μέρος της κεραίας. Όσον αφορά την εμπρόσθια κατεύθυνση της κεραίας, για αζιμουθιακή γωνία και γωνία ανύψωσης $\phi = \theta = 0^\circ$, το κέρδος είναι -0.54 dBi. Περιστρέφοντας την κεραία στο επίπεδο ανύψωσης υπό γωνία $\theta = 25^\circ$, το κέρδος μπορεί να ανέλθει στην τιμή των 3.81 dBi, για $\phi = 0^\circ$. Επιπλέον, το μέγιστο κέρδος για τη συχνότητα αυτή είναι 5.48 dBi, και παρατηρείται σε ανύψωση $\theta = 140^\circ$ στο πίσω μέρος της κεραίας ($\phi = 180^\circ$). Ομοίως, τα διαγράμματα ακτινοβολίας των 4.63 GHz δείχνουν ότι στο αζιμουθιακό επίπεδο ($\phi = 0^\circ$ ή 180°), η υψηλότερη δυνατή τιμή του κέρδους είναι 1.92 dBi και βρίσκεται σε γωνία $\theta = 322^\circ$. Στην εμπρόσθια κατεύθυνση της κεραίας, για $\phi = \theta = 0^\circ$, το κέρδος είναι 0.58 dBi. Επιπλέον, λαμβάνοντας συνολικά υπόψη και τα δύο επίπεδα περιστροφής της κεραίας, το μέγιστο κέρδος μπορεί να είναι ίσο με 3.97 dBi σε γωνία ανύψωσης $\theta = 152^\circ$ και σε αζιμουθιακή γωνία $\phi = 180^\circ$. Τέλος, τα διαγράμματα ακτινοβολίας των 6.22 GHz καταδεικνύουν έναν κύριο λοβό με μέγιστο κέρδος 9.12 dBi στο αζιμουθιακό επίπεδο, σε $\phi = 0^\circ$ και $\theta = 0^\circ$. Για τη συνθήκη $\phi = 0^\circ$ και εάν η κεραία περιστραφεί σε γωνία $\theta = 12^\circ$ στο επίπεδο ανύψωσης, τότε το κέρδος μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω έως τα 12.79 dBi.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η κεραία λειτουργεί σχεδόν εξίσου καλά και στις τρεις περιοχές των 2, 4 και 6 GHz ή, συγκεκριμένα, στις συχνότητες συντονισμού 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Ωστόσο, για τη συχνότητα των 6.22 GHz μπορεί να επιτευχθεί πολύ υψηλότερο κέρδος. Μια σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις της υλοποιημένης κεραίας μέσω του αναλυτή δικτύου, καθώς και από τις μετρήσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που έγιναν με τη βοήθεια του αναλυτή φάσματος, παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3. Αυτός περιλαμβάνει τις βασικές συχνότητες συντονισμού και

Κεφάλαιο 4: Υλοποίηση Επαναπροσδιοριζόμενης Κεραίας για το Σύστημα του Δέκτη

την αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου S11, του VSWR, του εύρους ζώνης όπως ορίζεται στο ύψος της τιμής -10 dB για την παράμετρο S11, καθώς και του μέγιστου επιτεύξιμου κέρδους για κάθε συντονισμό μαζί και με την αζιμουθιακή γωνία και τη γωνία ανύψωσης όπου αυτό παρατηρήθηκε.

Πίνακας 4.3: Σύνοψη των αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων της υλοποιημένης κεραίας για τους τρεις βασικούς συντονισμούς στην περιοχή των 2, 4 και 6 GHz.

Συχνότητα (GHz)	S11 (dB)	VSWR	Εύρος Ζώνης (MHz) Ορισμένο στα -10 dB	Μέγιστο Κέρδος (dBi)	Γωνίες Μέγιστου Κέρδους
2.07	-43.1	1.01	327	5.48	$\phi = 180^\circ$, $\theta = 140^\circ$
4.63	-41.3	1.02	260	3.97	$\phi = 180^\circ$, $\theta = 152^\circ$
6.22	-45.6	1.01	387	12.79	$\phi = 0^\circ$, $\theta = 12^\circ$

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρατηρούνται κάποιες μικρές αποκλίσεις. Στην προσομοίωση, οι τρεις κύριοι συντονισμοί εντοπίστηκαν στις συχνότητες 2.04, 4.44 και 6.42 GHz, ενώ στην υλοποιημένη κεραία βρέθηκαν σε συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Η απόκλιση μεταξύ των τριών περιπτώσεων είναι 30, 190 και 200 MHz αντίστοιχα, δηλαδή 1.4%, 4.2% και 3.1%. Επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν καλύτερη απόδοση της κεραίας στα 4.63 GHz, από αυτήν που φάνηκε μέσω της προσομοίωσης για τη συχνότητα των 4.44 GHz. Επιπλέον, τα διαγράμματα ακτινοβολίας της υλοποιημένης κεραίας παρουσιάζουν υψηλότερα κέρδη από εκείνα της προσομοίωσης. Για τις περιοχές των 2, 4 και 6 GHz, τα μέγιστα κέρδη όπως προέκυψαν από την προσομοίωση ήταν 0.58, 1.75 και 5.64 dBi, αντίστοιχα, ενώ τα αντίστοιχα κέρδη όταν μετρήθηκαν στην πράξη βρέθηκαν 5.48, 3.97 και 12.79 dBi, τα οποία είναι 4.9, 5.72 και 7.15 dB υψηλότερα από αυτά που έδειξε η προσομοίωση.

Οι αποκλίσεις μεταξύ της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων συνολικά δεν είναι μεγάλες, με εξαίρεση το προσομοιωμένο και το μετρούμενο κέρδος της κεραίας. Τέτοιες αποκλίσεις ήταν γενικά αναμενόμενες, δεδομένου ότι πολλοί παράγοντες δεν μπορούσαν να ληφθούν υπόψη από την προσομοίωση. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι επιδράσεις της κόλλησης που χρησιμοποιείται για την υποδοχή σήματος SMA, η δίοδος PIN, καθώς και οι επιδράσεις των ακίδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή τάσης σε αυτήν. Επίσης, στην υλοποιημένη κεραία έγινε επικασσιτέρωση για να αποφευχθεί η οξείδωση του χαλκού, η οποία ενδέχεται να έχει κάποια επίδραση στη λειτουργικότητά της. Ωστόσο, το βασικότερο αίτιο των αποκλίσεων της υλοποιημένης και της προσομοιωμένης κεραίας θα μπορούσε να είναι οι τιμές αντίστασης και χωρητικότητας που επιλέχθηκαν για το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου στην προσομοίωση. Και οι δύο αυτές παράμετροι, αλλά

κυρίως η τιμή της αντίστασης, εξαρτώνται από τη συχνότητα. Επειδή το περιβάλλον προσομοίωσης δεν υποστήριζε μη γραμμικά στοιχεία στις προσομοιώσεις, θεωρήθηκαν και οι δύο αυτές παράμετροι ως σταθερές σε όλο το εύρος συχνοτήτων που προσομοιώθηκε, από 0 έως 8 GHz. Επιπλέον, τα γραφήματα στα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών της διόδου περιγράφουν αυτές τις τιμές μόνο για συχνότητες έως 2 GHz. Έτσι, η συμπεριφορά της αντίστασης και της χωρητικότητας της διόδου για υψηλότερες συχνότητες θεωρήθηκε ότι είναι παραπλήσια, κάτι που μπορεί να μην ισχύει. Αυτός είναι πιθανώς και ο λόγος που η απόκλιση φαίνεται να είναι ελάχιστη στη περιοχή των 2 GHz. Τέλος, οι αποκλίσεις ως προς τα διαγράμματα ακτινοβολίας, και κυρίως ως προς το κέρδος, μπορεί να οφείλονται σε ανακλάσεις που συμβαίνουν στον χώρο γύρω από την κεραία κατά τις πειραματικές μετρήσεις ή στο ότι οι βασικοί συντονισμοί της υλοποιημένης κεραίας δε συμπίπτουν ακριβώς με εκείνους που υποδεικνύονται από την προσομοίωση.

Πειραματικά Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Η εφαρμογή Android που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, καθώς και η εξειδικευμένη πειραματική διάταξη πομπού-δέκτη που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων εξασθένησης σήματος σε πραγματικές συνθήκες και τη συσχέτιση αυτών με την ένταση της βροχής. Επιπλέον, διερευνήθηκε και η πιθανή συσχέτιση της εξασθένηση σήματος με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους στην περίπτωση των μετρήσεων που έγιναν μέσω της εφαρμογής. Η πειραματική διαδικασία και όλα τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

5.2 Μετεωρολογικές παράμετροι

Τόσο στην περίπτωση μετρήσεων της ισχύος σήματος μέσω της εφαρμογής Android όσο και στην περίπτωση των μετρήσεων μέσω της πειραματικής διάταξης, διερευνήθηκε η συσχέτιση με την ένταση της βροχής. Επιπλέον, για τις μετρήσεις μέσω της εφαρμογής Android διερευνήθηκε η συσχέτιση και με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους. Οι μετρήσεις όλων των σχετικών παραμέτρων προήλθαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα πιεζοηλεκτρικό βαρόμετρο ακρίβειας ± 1 hPa, το οποίο κατέγραφε την ατμοσφαιρική πίεση (P). Χρησιμοποιήθηκε επιπλέον ένας αισθητήρας θερμοκρασίας του αέρα (T) και ένας σχετικής υγρασίας (RH), με ακρίβεια ± 0.1 °C και $\pm 0.1\%$ αντίστοιχα, καθώς και ένα βροχόμετρο ανατρεπόμενου κάδου που μετρούσε την ένταση της βροχής με ακρίβεια ± 0.2 mm. Όλοι οι μετεωρολογικοί αισθητήρες εγκαταστάθηκαν και συντηρούνταν κατάλληλα, ώστε να παρέχουν αξιόπιστες μετρήσεις, αντιπροσωπευτικές της ευρύτερης περιοχής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Η χρονική ανάλυση των μετρήσεων του μετεωρολογικού σταθμού ήταν 30 λεπτά για την ατμοσφαιρική πίεση, 15 λεπτά για τη θερμοκρασία του αέρα και τη σχετική υγρασία και 5 λεπτά για το ύψος της βροχής. Οι παραπάνω τιμές της χρονικής ανάλυσης ήταν σε συμφωνία με τη μεταβλητότητα των αντίστοιχων παραμέτρων. Η βροχή είναι μια παράμετρος που παρουσιάζει μεταβολές υψηλής συχνότητας και, ως εκ τούτου, η χρονική ανάλυση των αντίστοιχων μετρήσεων ήταν η υψηλότερη. Αντίθετα, η ατμοσφαιρική πίεση δεν

χαρακτηρίζεται από υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις, και μια χρονική ανάλυση μεγαλύτερη από 30 λεπτά δεν θα προσέφερε σημαντικές πληροφορίες. Από τις παραπάνω παραμέτρους υπολογίζονται επιπλέον η τάση υδρατμών (e), η μέγιστη τάση υδρατμών (e_s), η απόλυτη υγρασία (AH) και η ραδιο-διαθλαστικότητα του αέρα (N).

Μια φωτογραφία του μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων ακολουθεί στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Στη μετεωρολογία, η τάση υδρατμών αναφέρεται στο μέρος της ατμοσφαιρικής πίεσης που ασκείται από τα μόρια των υδρατμών του αέρα και εκφράζει εμμέσως την περιεκτικότητά του σε υδρατμούς. Η μέγιστη τάση υδρατμών είναι η μέγιστη πίεση που μπορούν να ασκήσουν οι υδρατμοί για μια δεδομένη θερμοκρασία, πέρα από την οποία παρατηρείται συμπύκνωση. Η μέγιστη τάση υδρατμών εξαρτάται από τη θερμοκρασία μέσω της εξίσωσης Clausius-Clapeyron (εξίσωση 5.1). Τόσο η τάση υδρατμών όσο και η μέγιστη τάση υδρατμών εκφράζονται συνήθως σε hectopascals (hPa) ή millibars (mb) οι οποίες είναι ταυτόσημες μονάδες ($1 \text{ hPa} = 1 \text{ mb}$). Η σχετική υγρασία είναι ο λόγος της τρέχουσας τάσης υδρατμών προς τη μέγιστη τάση υδρατμών στην ίδια θερμοκρασία, εκφρασμένος ως ποσοστό (%). Δείχνει

πόσο κοντά βρίσκεται ο αέρας στο να είναι πλήρως κορεσμένος με υγρασία. Η απόλυτη υγρασία είναι η συνολική ποσότητα υδρατμών που υπάρχουν σε δεδομένο όγκο αέρα, συνήθως εκφρασμένη σε gr/m^3 , και δείχνει την περιεκτικότητα του αέρα σε υγρασία. Τέλος, η ραδιο-διαθλαστικότητα του αέρα είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η ατμόσφαιρα διαθλά τα ραδιοκύματα επηρεαζόμενη από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία. Η υψηλή περιεκτικότητα σε υδρατμούς μπορεί να αυξήσει τη διαθλαστικότητα, επηρεάζοντας τη διάδοση των ραδιοκυμάτων.

Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης υδρατμών (e_s) χρησιμοποιείται η σχέση Clausius-Clapeyron:

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{LM_v}{R} \frac{dT}{T^2}, \quad (5.1)$$

όπου οι σταθερές L , M_v και R είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, το μοριακό βάρος του νερού και η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Έπειτα, η τάση υδρατμών μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον ορισμό της σχετικής υγρασίας (RH), σύμφωνα με τη σχέση:

$$e = RHe_s. \quad (5.2)$$

Η απόλυτη υγρασία (AH) μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της καταστατικής εξίσωσης των ιδανικών αερίων, δηλαδή:

$$AH = \frac{eM_v}{RT}. \quad (5.3)$$

Τέλος, η ραδιο-διαθλαστικότητα του αέρα μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά από την ατμοσφαιρική πίεση (P), την τάση υδρατμών (e) και τη θερμοκρασία (T) μέσω της σχέσης [168]:

$$N = \frac{77.7}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right), \quad (5.4)$$

όπου η θερμοκρασία εκφράζεται σε K, ενώ η πίεση αλλά και η τάση υδρατμών εκφράζονται σε hPa.

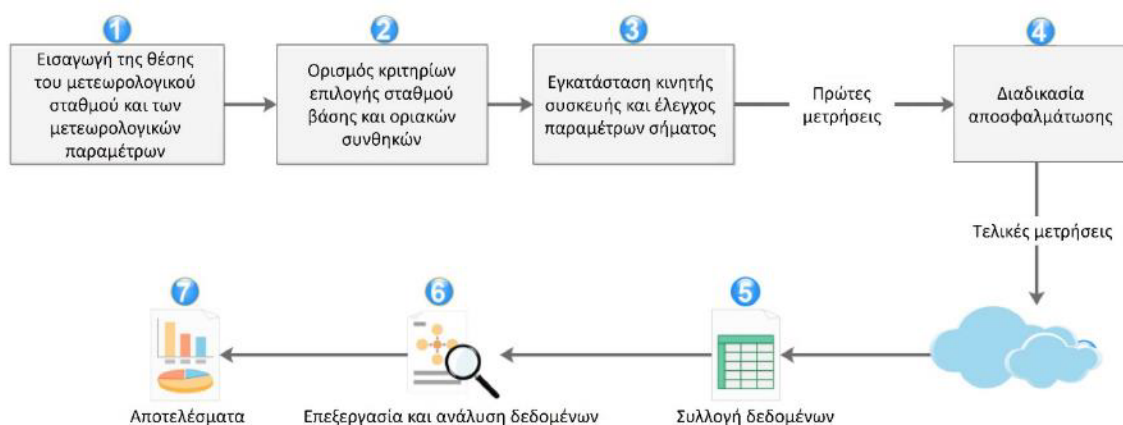
5.3 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εφαρμογής Android

Για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων της ισχύος σήματος μέσω της εφαρμογής Android, αυτή εγκαταστάθηκε σε μια κινητή συσκευή που έτρεχε Android 8. Η συσκευή επέτρεπε

ακρίβεια 1 dB στις μετρήσεις του RSSI. Η περίοδος κατά την οποία συλλέχθηκαν μετρήσεις μέσω της εφαρμογής ήταν από τον Απρίλιο του 2023, έως και τον Νοέμβριο του 2023.

5.3.1 Τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων

Είναι γνωστό ότι μετεωρολογικές παράμετροι όπως η βροχή και η υγρασία παρουσιάζουν έντονη χωρική μεταβλητότητα, κυρίως κατά τη διάρκεια ακραίων φαινομένων. Ως εκ τούτου, η τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων επιλέχθηκε ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στον μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Πριν από τις πειραματικές μετρήσεις ήταν απαραίτητες οι τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων και του σήματος στην τοποθεσία που επιλέχθηκε, με συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Η σύντομη ροή εργασιών για τη διεξαγωγή των μετρήσεων φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 5.2.



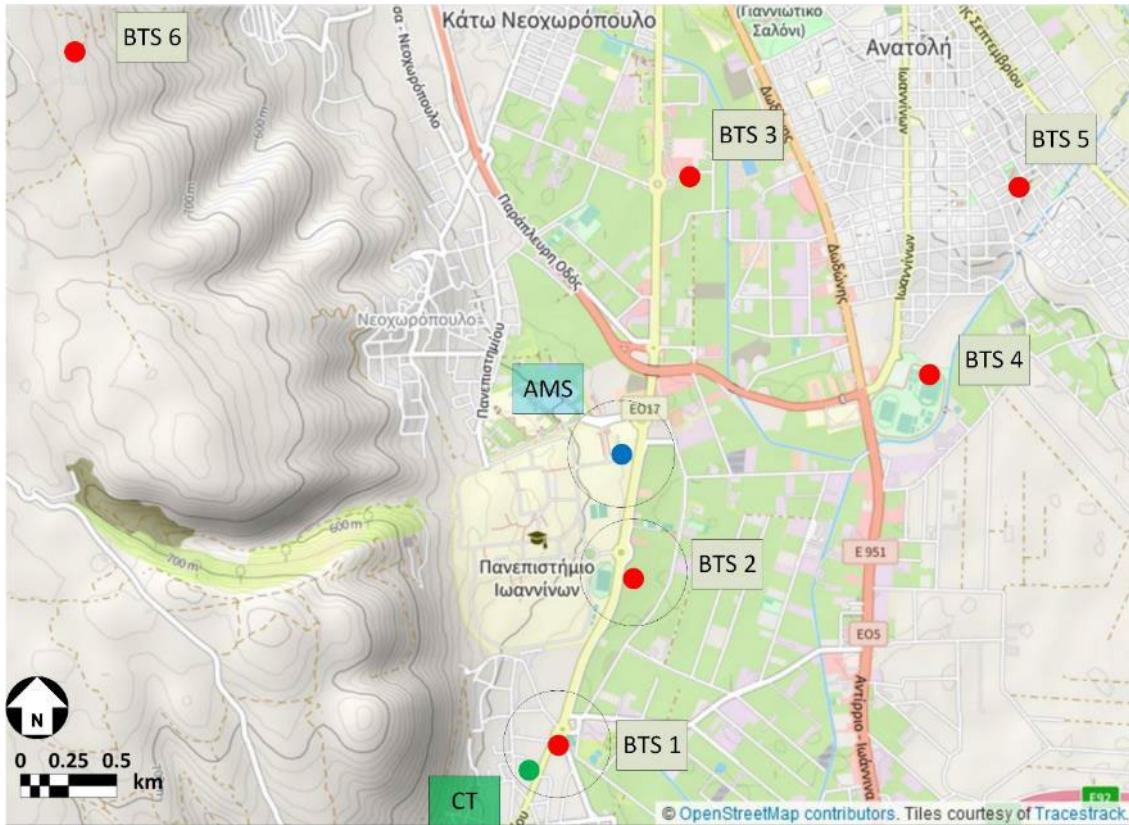
Σχήμα 5.2: Ροή εργασιών που ακολουθήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων RSSI μέσω της εφαρμογής Android.

Το σχήμα αυτό περιγράφει τις διαδικασίες που έπονται της εισαγωγής της θέσης του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού (AMS, Automatic Meteorological Station) και των μετεωρολογικών παραμέτρων μέχρι τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι τελικές μετρήσεις και τα ακατέργαστα δεδομένα που αποθηκεύονταν στη μνήμη της κινητής συσκευής συλλέγονταν απομακρυσμένα για την επεξεργασία και ανάλυσή τους.

Ο μετεωρολογικός σταθμός του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων βρίσκεται εντός της πανεπιστημιούπολης. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η θέση του στον χάρτη. Οι γεωγραφικές του συντεταγμένες αλλά και το υψόμετρο του σταθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, όπως επίσης και οι αντίστοιχες παράμετροι για διάφορους σταθμούς βάσης πομποδεκτών (BTS, Base Transceiver Station) οι οποίοι λήφθηκαν υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής του σημείου όπου τελικά θα τοποθετούνταν η κινητή συσκευή (CT, Cellular Terminal) για την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Στον πίνακα, περιλαμβάνεται επίσης και η απόσταση κάθε πιθανού σταθμού βάσης από τον μετεωρολογικό σταθμό. Στον χάρτη του Σχήματος 5.3 φαίνονται και οι θέσεις των σταθμών βάσης (BTS 1 έως 6, κόκκινο χρώμα) της

5.3 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εφαρμογής Android

ευρύτερης περιοχής του μετεωρολογικού σταθμού (AMS, μπλε χρώμα), αλλά και η θέση όπου τελικά τοποθετήθηκε η κινητή συσκευή (CT, πράσινο χρώμα) και όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ισχύος σήματος.



Σχήμα 5.3: Χάρτης που απεικονίζει τη θέση του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (AMS, μπλε χρώμα), των σταθμών βάσης πομποδεκτών της ευρύτερης περιοχής (BTS 1 έως 6, κόκκινο χρώμα) και της κινητής συσκευής (CT, πράσινο χρώμα).

Πίνακας 5.1: Γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (AMS) και των σταθμών βάσης πομποδεκτών της ευρύτερης περιοχής, καθώς και απόσταση κάθε σταθμού βάσης από τον μετεωρολογικό σταθμό.

Σημείο	Γεωγραφικές Συντεταγμένες	Απόσταση από τον AMS (km)	Υψόμετρο (m)
AMS *	39°37'10.5" N 20°50'48" E	0	487
BTS + 1	39°36'21.7" N 20°50'32.7" E	1.5	482
BTS 2	39°36'50.3" N 20°50'48.3" E	0.6	485
BTS 3	39°37'59" N 20°51'00" E	1.5	477
BTS 4	39°37'24.7" N 20°51'53.1" E	1.6	477
BTS 5	39°37'56.5" N 20°52'12.8" E	2.5	506
BTS 6	39°38'17" N 20°48'50.3" E	3.5	769

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, υπάρχουν έξι σταθμοί βάσης πομποδεκτών (BTS) στην ευρύτερη περιοχή του μετεωρολογικού σταθμού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Για την επιλογή του καταλληλότερου από τους έξι σταθμούς βάσης με σκοπό τον σχηματισμό ζεύξης μεταξύ αυτού και μιας κινητής συσκευής και τη μετέπειτα καταγραφή των μετρήσεων ισχύος σήματος, ορίστηκαν συνολικά τέσσερα βασικά κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά είναι τα εξής:

- α. απόσταση μικρότερη του 1.5 km από τον AMS,
- β. δυνατότητα τοποθέτησης της κινητής συσκευής σε ακτίνα όχι μεγαλύτερη των 250 m από τον BTS για να εξασφαλιστεί πως η βροχή είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη,
- γ. δυνατότητα τοποθέτησης της κινητής συσκευής στο ίδιο ύψος με την κεραία και διατήρηση οπτικής επαφής LOS (Line Of Sight) με τον BTS και
- δ. δυνατότητα τοποθέτησης της κινητής συσκευής σε σημείο που είναι προστατευμένο και προσβάσιμο.

Ο BTS 6 βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 3.5 km από τον AMS, έξω από το χωριό των Μαρμάρων, και σε υψόμετρο 769 m. Αντίστοιχα, Ο BTS 5 βρίσκεται σε απόσταση 2.5 km και σε υψόμετρο 506 m. Οι δύο αυτοί BTS αποκλείστηκαν λόγω της υψομετρικής διαφοράς και της απόστασης από τον AMS. Υπήρχαν τέσσερις ακόμα επιλογές σταθμών βάσης σε μέγιστη ακτίνα 1.5 km γύρω από τον AMS. Συγκεκριμένα, οι BTS 4 και BTS 3 βρίσκονταν σε απόσταση περίπου 1.5 km από το σημείο αναφοράς. Όσον αφορά τον BTS 4, δεν υπήρχε δυνατότητα τοποθέτησης κινητής συσκευής που να πληροί το κριτήριο (γ), καθώς η κεραία του BTS 4 βρίσκονταν στην κορυφή πύργου προβολέα σταδίου σε ύψος άνω των 15 m. Επιπλέον, ο BTS 3 αποκλείστηκε επειδή δεν πληρούσε το κριτήριο (δ). Όσο για τον BTS 2, ήταν ιδανικός καθώς βρισκόταν στη μικρότερη δυνατή απόσταση. Από την άλλη πλευρά, ο BTS 2 δεν πληρούσε ούτε αυτός το κριτήριο (δ). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποσφαλμάτωσης, μετρήσεις συλλέχθηκαν επίσης κοντά στον AMS, αλλά σε αυτήν την περίπτωση η κινητή συσκευή σχημάτιζε ζεύξη είτε με τον BTS 3 είτε με τον BTS 6. Τέλος, ήταν δυνατή η τοποθέτηση μιας κινητής συσκευής εντός της ακτίνας του BTS 1, ο οποίος πληρούσε και τα κριτήρια (β) και (γ). Η κινητή συσκευή (CT) που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση και την καταγραφή των δεδομένων, τοποθετήθηκε τελικά σε σταθερή απόσταση 228 m από τον BTS 1 με τον οποίο και σχημάτιζε ζεύξη.

Ο BTS 1 είναι ένας τυπικός πομποδέκτης σταθμού βάσης πολλαπλών ζωνών που λειτουργεί σε διάφορες συχνότητες (800/900/1800/2100/2600 MHz). Οι λεπτομέρειες των βασικών παραμέτρων του BTS 1 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 [169]. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μεταξύ της κινητής συσκευής και του σταθμού βάσης διατηρήθηκε καθαρή οπτική επαφή (LOS). Η LOS εξασφάλιζε ποιοτικότερες μετρήσεις, καθώς τυχόν παρεμβαλλόμενα εμπόδια θα μπορούσαν να διαταράξουν σημαντικά τη σταθερότητα του σήματος μέσω ανακλάσεων, απορρόφησης, σκίασης και άλλων παραγόντων. Το Σχήμα 5.4 περιλαμβάνει μια φωτογραφία στο ύψος του εδάφους όπου απεικονίζεται η περιοχή μεταξύ της κινητής συσκευής και του σταθμού βάσης BTS 1.

Πίνακας 5.2: Παράμετροι το σταθμού βάσης BTS 1.

Παράμετρος	Τιμή
Κωδικός αριθμού τοποθεσίας	1106093
Αναγνωριστικό κυττάρου	230153
Συχνότητα κατερχόμενης Ζεύξης (MHz)	2630
Μέγιστο κέρδος κυρίου λοβού (dBi)	18.3
Ισχύς στην είσοδο της κεραίας (W)	6

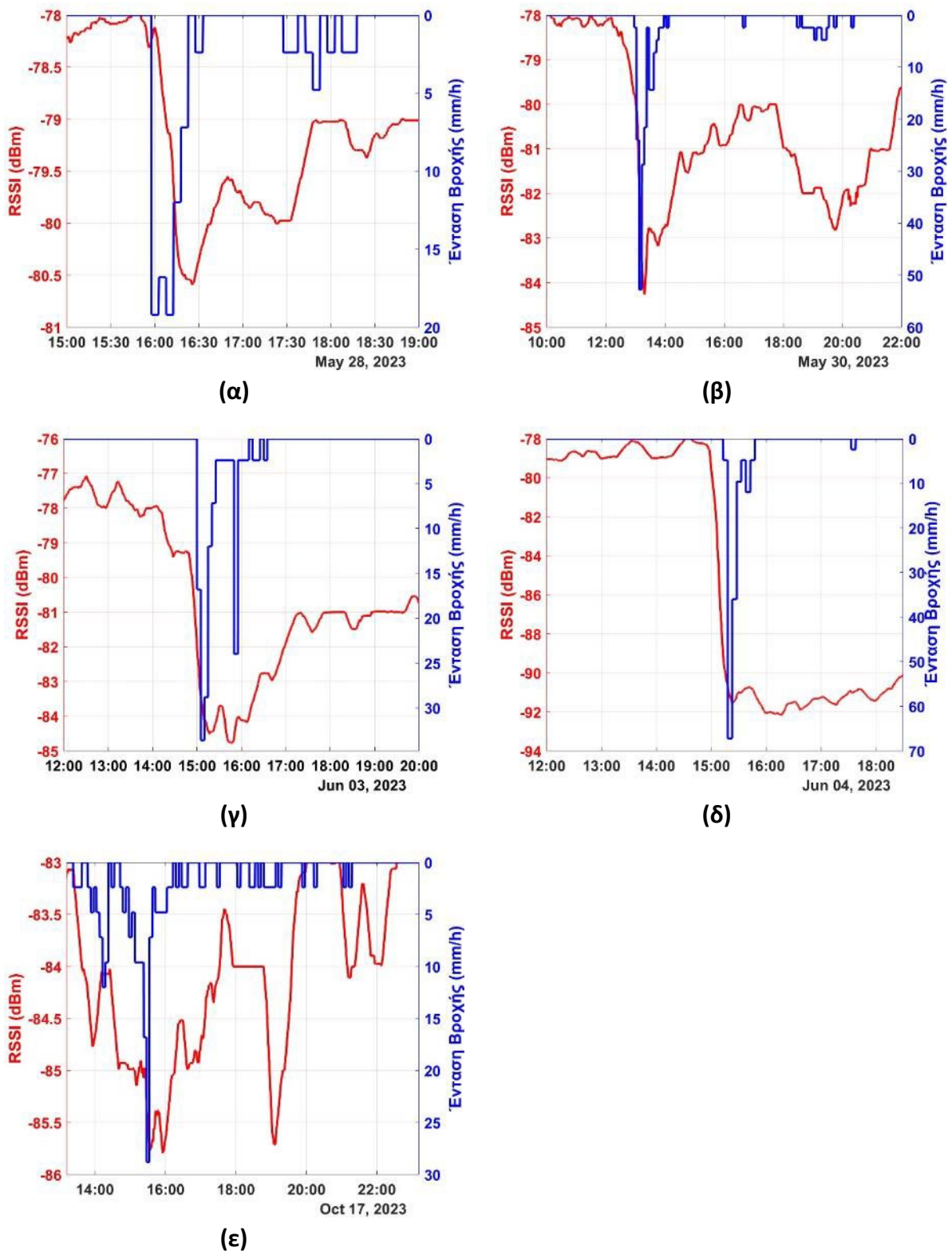


Σχήμα 5.4: Φωτογραφία στο ύψος του εδάφους της περιοχής μεταξύ της κινητής συσκευής και του σταθμού βάσης BTS 1.

5.3.2 Αποτελέσματα

Ταξινόμηση της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος

Ο βασικός στόχος των πειραματικών μετρήσεων ήταν η αξιολόγηση της επίδρασης της βροχής στην ισχύ του σήματος (RSSI) που καταγράφεται από την κινητή συσκευή. Ένας κινητός μέσος όρος χρονικού παραθύρου 5 λεπτών εφαρμόστηκε στα δεδομένα RSSI τα οποία λαμβάνονταν από την εφαρμογή κάθε 10 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν στη συνέχεια με την ένταση της βροχής (εκφρασμένη σε mm/h) που παρατηρήθηκε μεταξύ του Μαΐου και του Νοεμβρίου του 2023. Πέντε παραδείγματα από περιπτώσεις βροχής καθώς και η συμπεριφορά του RSSI παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5. Ο άξονας της έντασης της βροχής είναι αντεστραμμένος, με την τιμή των 0 mm/h να βρίσκεται στην κορυφή, για ένα καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα όταν αντιπαραβάλλεται με τις μετρήσεις του RSSI.



Σχήμα 5.5: Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος που μετρήθηκε από την κινητή συσκευή (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες **(α)** 28 Μαΐου 2023, **(β)** 30 Μαΐου 2023, **(γ)** 3 Ιουνίου 2023, **(δ)** 4 Ιουνίου 2023 και **(ε)** 17 Οκτωβρίου 2023.

Οι γραφικές αναπαραστάσεις στο Σχήμα 5.5 δείχνουν ότι η παρουσία βροχής προκαλεί μείωση της ισχύος του σήματος. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση στο Σχήμα 5.5γ, όπου η βροχή περιλάμβανε επίσης και χαλάζι, με αποτέλεσμα τη σημαντική εξασθένηση της ισχύος του σήματος. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η ισχύς του σήματος δεν επανήλθε αμέσως στα προ βροχής επίπεδα μετά το πέρας της βροχής. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην ταυτόχρονη αύξηση της υγρασίας που προκαλείται από την βροχή, και η οποία τείνει να παραμένει για παρατεταμένη διάρκεια.

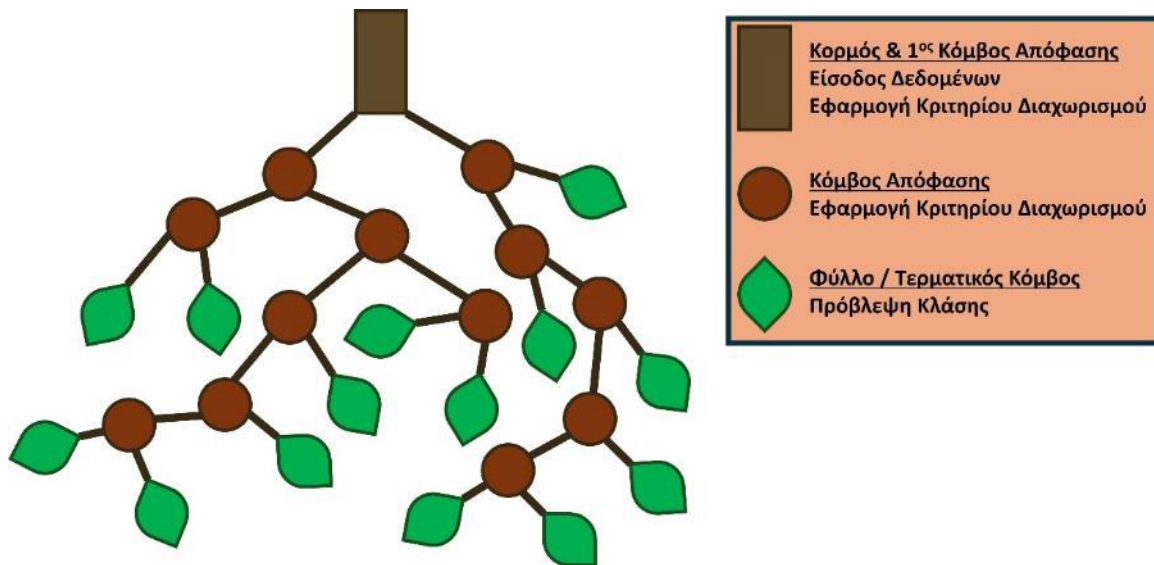
Αν και στις περιπτώσεις που απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5 αποκαλύπτεται μια ευδιάκριτη απώλεια ισχύος κατά τη διάρκεια βροχών, η ακρίβεια 1 dB στις μετρήσεις RSSI της χρησιμοποιούμενης κινητής συσκευής δεν επέτρεψε τον ακριβή προσδιορισμό της έντασης της βροχής με βάση την εκάστοτε τιμή του RSSI. Ως εκ τούτου, διερευνήθηκε μια προσέγγιση κατηγοριοποίησης της βροχής. Η ένταση της βροχής κατηγοριοποιήθηκε στις ακόλουθες πέντε κλάσεις:

1. Μηδενική Βροχή, 0 mm/h,
2. Ασθενής Βροχή, από 0 έως 3 mm/h,
3. Μέτρια Βροχή, από 3 έως 15 mm/h,
4. Έντονη Βροχή, από 15 έως 30 mm/h,
5. Πολύ Έντονη Βροχή, τουλάχιστον 30 mm/h.

Η εξασθένηση σήματος λόγω της βροχής υπολογίστηκε με την αφαίρεση των τιμών RSSI κατά τη διάρκεια βροχής από τη μέση τιμή του RSSI που παρατηρήθηκε σε ένα διάστημα το πολύ 6 ωρών πριν από την έναρξη της βροχής, και κατά το οποίο το σήμα ήταν γενικά σταθερό. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύνολο δεδομένων, το οποίο περιλάμβανε περίπου 40.000 τιμές εξασθένησης σήματος και τις αντίστοιχες τιμές έντασης της βροχής, για την εκπαίδευση και τον έλεγχο της ακρίβειας των προβλέψεων πέντε μοντέλων ταξινόμησης βασισμένων σε μηχανική μάθηση. Ένα υποσύνολο 10% του πλήρους συνόλου δεδομένων προορίστηκε για τη δοκιμή της αποτελεσματικότητας του μοντέλου. Τα μοντέλα εκπαιδεύτηκαν χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Classification Learner του Matlab, η οποία είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο σχεδιασμένο για την εκπαίδευση μοντέλων ταξινόμησης. Από τα πέντε μοντέλα, τα καλύτερα αποτελέσματα έδειξε ένα μοντέλο ταξινόμησης βασισμένο σε δέντρο αποφάσεων.

Γενικά, ένα δέντρο ταξινόμησης αποτελείται από διάφορους κόμβους (nodes). Ξεκινά με έναν κόμβο-κορμό (root node), ο οποίος συμβολίζει το σύνολο των δεδομένων εισόδου. Ο κορμός είναι και ο πρώτος κόμβος απόφασης (decision node) που οδηγεί σε επόμενους εσωτερικούς κόμβους απόφασης. Σε καθέναν από αυτούς τους κόμβους αξιολογείται ένα συγκεκριμένο στοιχείο (feature), όπως η εξασθένηση σήματος στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, και τα δεδομένα διαχωρίζονται με βάση ένα κριτήριο διαχωρισμού (split criterion). Αυτή η επαναλαμβανόμενη διαδικασία δημιουργεί διακλαδώσεις και κόμβους φύλλων (leaf nodes), όπου οι τελευταίοι αντιπροσωπεύουν τις τελικές προβλεφθείσες κλάσεις. Το δέντρο κατασκευάζεται με τη βελτιστοποίηση των στοιχείων και των ορίων αποφάσεων για την

ελαχιστοποίηση της ακαθαρσίας (impurity). Κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης, τα νέα δεδομένα διαπερνούν το δέντρο από τον κορμό προς ένα φύλλο και η προβλεφθείσα κλάση προκύπτει από την κλάση πλειοψηφίας σε αυτό το φύλλο. Το γενικό διάγραμμα ενός δέντρου ταξινόμησης απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Γενικό διάγραμμα ενός δέντρου ταξινόμησης.

Το δέντρο ταξινόμησης που εκπαιδεύτηκε στην παρούσα μελέτη ήταν ένα δυαδικό δέντρο, όπου κάθε κόμβος απόφασης είχε πάντα έναν γονικό κόμβο (parent node) και δύο θυγατρικούς κόμβους (child nodes). Επιπλέον, το δέντρο βασίστηκε στον δείκτη ποικιλομορφίας Gini ως κριτήριο διαχωρισμού. Ο δείκτης Gini σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης εκφράζεται ως εξής:

$$g(t) = 1 - \sum_i p^2(i|t), \quad (5.5)$$

όπου το t αντιπροσωπεύει τον κόμβο στον οποίο εφαρμόζεται το κριτήριο διαχωρισμού, το i υποδηλώνει τον συνολικό αριθμό των κλάσεων στο σύνολο δεδομένων και το $p(i|t)$ δηλώνει την πιθανότητα της κλάσης i στον κόμβο t . Ο δείκτης Gini χρησιμεύει ως μια μέθοδος μέτρησης της ποσοτικοποίησης της ακαθαρσίας εντός ενός δέντρου αποφάσεων, αποδίδοντας τιμές μεταξύ 0 και 1. Μια τιμή του δείκτη Gini 0 ορίζει έναν καθαρό κόμβο, υποδεικνύοντας έναν κόμβο που περιλαμβάνει αποκλειστικά δεδομένα από μία μόνο κλάση. Κάθε τιμή εξασθένησης σήματος σε έναν δεδομένο κόμβο είναι ένας δυνητικός υποψήφιος διαχωρισμού του κόμβου. Για κάθε υποψήφιο, δημιουργούνται δύο θυγατρικοί κόμβοι, ένας αριστερός και ένας δεξιός. Στη συνέχεια, η μείωση της ακαθαρσίας, ΔI , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta I = g(t) - \left(\frac{N_L}{N} g(t_L) + \frac{N_R}{N} g(t_R) \right), \quad (5.6)$$

όπου το t_L αντιπροσωπεύει τον αριστερό και το t_R τον δεξιό θυγατρικό κόμβο, N_L και N_R είναι οι αριθμοί των παρατηρήσεων στον αριστερό και τον δεξιό κόμβο αντίστοιχα, και N είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων στον γονικό κόμβο, t . Τελικά, ο διαχωρισμός που εφαρμόζεται είναι εκείνος που μεγιστοποιεί τη μείωση της ακαθαρσίας [170–173]. Οι επιμέρους κόμβοι παύουν τον περαιτέρω διαχωρισμό στην περίπτωση που ένας προτεινόμενος διαχωρισμός θα οδηγούσε σε θυγατρικό κόμβο με λιγότερες από 10 παρατηρήσεις ή σε κόμβο-φύλλο που δεν περιέχει καθόλου παρατηρήσεις. Η ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει με ακρίβεια την κλάση εντός της οποίας εμπίπτει η πραγματική ένταση της βροχής με βάση την απώλεια ισχύος απεικονίζεται στον πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) του Σχήματος 5.7.

Πραγματική Κλάση	1. Μηδενική Βροχή	99.8%	0.1%	0.1%		0.0%	99.8%	0.2%	
	2. Ασθενής Βροχή		88.6%	9.1%	2.3%		88.6%	11.4%	
	3. Μέτρια Βροχή		2.0%	82.4%	15.7%		82.4%	17.6%	
	4. Ισχυρή Βροχή		7.1%	7.1%	81.3%	4.4%	81.3%	18.7%	
	5. Πολύ Ισχυρή Βροχή			7.1%	2.9%	90.0%	90.0%	10.0%	
							TPR	FNR	
			1. Μηδενική Βροχή	2. Ασθενής Βροχή	3. Μέτρια Βροχή	4. Ισχυρή Βροχή	5. Πολύ Ισχυρή Βροχή		
			Προβλεφθείσα Κλάση						

Σχήμα 5.7: Πίνακας σύγχυσης του μοντέλου δέντρου αποφάσεων που εκπαιδεύτηκε για την πρόβλεψη της κλάσης της βροχής με βάση τα δεδομένα εξασθένησης σήματος, καθώς και τα πραγματικά θετικά ποσοστά (TPR) και τα ψευδώς αρνητικά ποσοστά (FNR) που αφορούν κάθε μια από τις κλάσεις.

Σύμφωνα με τον πίνακα σύγχυσης του σχήματος, το εκπαιδευμένο μοντέλο παρουσίασε συνολική ακρίβεια 88.4% στις προβλέψεις της κλάσης της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος. Ο πίνακας καταδεικνύει την πολύ καλή απόδοση του μοντέλου στην πρόβλεψη της απουσίας βροχής, δηλαδή στα συμβάντα που αντιστοιχούν στην κατηγορία

“Μηδενική Βροχή”, όπου το αληθώς θετικό ποσοστό (TPR, True Positive Rate), το ποσοστό δηλαδή των σωστών προβλέψεων για τη συγκεκριμένη κλάση, είναι 99.8%. Για τις άλλες κλάσεις, δηλαδή “Ασθενής Βροχή”, “Μέτρια Βροχή”, “Ισχυρή Βροχή” και “Πολύ Ισχυρή Βροχή”, το μοντέλο πέτυχε σωστές προβλέψεις σε ποσοστά 88.6%, 82.4%, 81.3% και 90%, αντίστοιχα.

Το υψηλότερο παρατηρούμενο ψευδώς αρνητικό ποσοστό (FNR, False Negative Rate), δηλαδή το ποσοστό λανθασμένων προβλέψεων για μια συγκεκριμένη κλάση, ήταν 18.7% και αφορούσε την κλάση “Ισχυρή Βροχή”. Στο πλαίσιο αυτής της λανθασμένης ταξινόμησης, το 7.1% των περιπτώσεων αφορούσε το μοντέλο να προβλέπει λανθασμένα “Ασθενής Βροχή”, ένα άλλο 7.1% αντιστοιχούσε στη λανθασμένη πρόβλεψη “Μέτρια Βροχή” από το μοντέλο, και το υπόλοιπο 4.4% αφορούσε το μοντέλο να προβλέπει λανθασμένα “Πολύ Ισχυρή Βροχή”. Και στις τρεις περιπτώσεις η πραγματική κλάση, εκείνη δηλαδή που θα έπρεπε να είχε προβλέψει το μοντέλο, ήταν η “Ισχυρή Βροχή”. Για τις υπόλοιπες κλάσεις, δηλαδή “Μηδενική Βροχή”, “Ασθενής Βροχή”, “Μέτρια Βροχή” και “Πολύ Ισχυρή Βροχή”, τα ψευδώς αρνητικά ποσοστά ήταν ίσα με 0.2%, 11.4%, 17.6% και 10%, αντίστοιχα.

Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι αν και η πρόβλεψη της ακριβούς έντασης της βροχής με βάση τις μετρήσεις εξασθένησης σήματος ήταν ένα δύσκολο εγχείρημα, οι μετρήσεις αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την ταξινόμηση της έντασης της βροχής με αρκετά καλή ακρίβεια.

Το προαναφερθέν μοντέλο δέντρου αποφάσεων απέδωσε την υψηλότερη συνολική ακρίβεια σε σύγκριση με τέσσερα άλλα κοινώς χρησιμοποιούμενα μοντέλα ταξινόμησης. Τα υπόλοιπα τέσσερα μοντέλα που εξετάστηκαν μέσω της εφαρμογής Classification Learner του MATLAB ήταν τα εξής: μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (SVM, Support Vector Machine) [174,175], K-Πλησιέστεροι Γείτονες (KNN, K-Nearest Neighbors) [176,177], Προσαρμοστική Ενίσχυση (AdaBoost, Adaptive Boosting) με δέντρα αποφάσεων ως βασικούς εκπαιδευόμενους (learners) [178,179] και Νευρωνικό Δίκτυο Εμπρόσθιας Τροφοδότησης (FNN, Feedforward Neural Network) [180,181]. Στο μοντέλο SVM χρησιμοποιήθηκε ένας γκαουσιανός πυρήνας (kernel) με παράμετρο κλίμακας (scale factor) 0.25 για την κατασκευή ενός υπερεπιπέδου (hyperplane) για το διαχωρισμό των κλάσεων. Το KNN προσδιόρισε την κλάση των σημείων δεδομένων με βάση την πλειοψηφική κλάση μεταξύ των πλησιέστερων γειτόνων τους, με την ευκλείδεια απόσταση να χρησιμοποιείται ως μετρική απόστασης. Το AdaBoost με δέντρα αποφάσεων προσαρμοσε τα βάρη των λανθασμένα ταξινομημένων δεδομένων σε 30 επαναλήψεις ενίσχυσης (boosting iterations) με ρυθμό μάθησης (learning rate) 0.1. Το FNN αποτελούνταν από ένα μόνο κρυφό στρώμα με 25 νευρώνες που χρησιμοποιούσαν τη συνάρτηση ενεργοποίησης ReLU (Rectified Linear Unit) για την ταξινόμηση. Η συνολική ακρίβεια αυτών των μοντέλων ήταν 88.4% για το μοντέλο δέντρου αποφάσεων, 81.4% για το SVM, 80.6% για το KNN, 85.5% για το AdaBoost και 76.4% για το FNN. Μια σύγκριση μεταξύ και των πέντε μοντέλων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.3, ο οποίος περιλαμβάνει τις τιμές TPR για κάθε μοντέλο και κλάση, καθώς και τη συνολική ακρίβεια σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση της ακρίβειας, με βάση το αληθώς θετικό ποσοστό (TPR), για τα πέντε μοντέλα που εκπαιδεύτηκαν: Δέντρο Αποφάσεων, Μηχανή Διανυσμάτων Υποστήριξης (SVM), Κ-Πλησιέστεροι Γείτονες (KNN), Προσαρμοστική Ενίσχυση (AdaBoost) και Νευρωνικό Δίκτυο Εμπρόσθιας Τροφοδότησης (FNN).

Μοντέλο Ταξινόμησης	Δέντρο Αποφάσεων TPR (%)	SVM TPR (%)	KNN TPR (%)	AdaBoost TPR (%)	FNN TPR (%)
Κλάση					
1. Μηδενική Βροχή	99.8	91.3	99.8	93.9	90.1
2. Ασθενής Βροχή	88.6	75	100	81.3	73.7
3. Μέτρια Βροχή	82.4	76.5	74.5	80.9	65
4. Ισχυρή Βροχή	81.3	78.6	42.8	82.8	72.8
5. Πολύ Ισχυρή Βροχή	90	85.7	85.7	88.5	80.1
Συνολική Ακρίβεια (%)	88.4	81.4	80.6	85.5	76.4

Συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη μελέτη που παρουσιάστηκε στην παρούσα ενότητα και οι βασικές παρατηρήσεις ήταν:

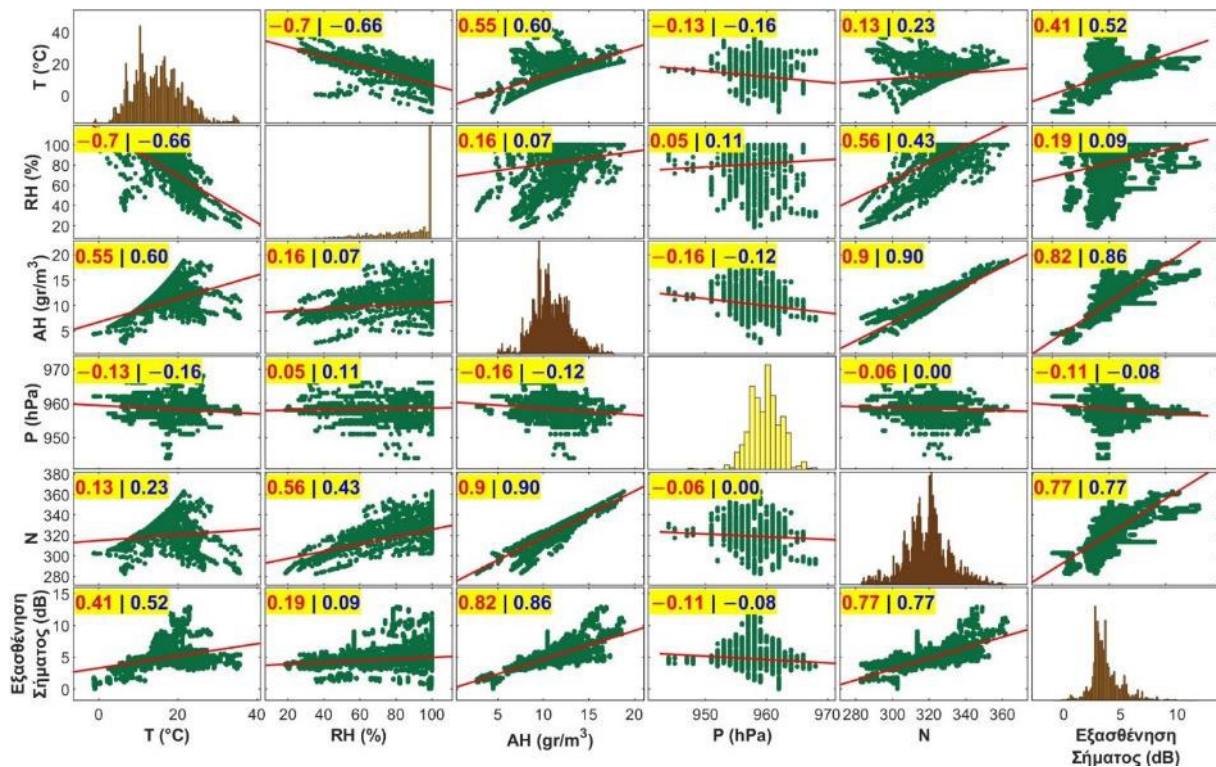
1. Διεξαγωγή μετρήσεων της ισχύος σήματος (RSSI) μεταξύ Μαΐου και Νοεμβρίου του 2023, σχεδόν για επτά μήνες.
2. Εφαρμογή κινητού μέσου όρου με χρονικό παράθυρο 5 λεπτών στα δεδομένα RSSI.
3. Τα αποτελέσματα για διάφορα γεγονότα βροχής έδειξαν εξασθένηση του σήματος, ωστόσο η περιορισμένη ακρίβεια 1 dB στις μετρήσεις ισχύος δεν ήταν αρκετή για την ακριβή εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω αυτής.
4. Με το πέρας της βροχής η ισχύς σήματος δεν επανέρχονταν στα αρχικά της επίπεδα, πιθανότατα λόγω της αυξημένης υγρασίας που παρέμενε στον αέρα.
5. Η έντασης της βροχής κατηγοριοποιήθηκε σε πέντε κλάσεις.
6. Εκπαίδευση ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης βασισμένο σε δέντρο ταξινόμησης το οποίο και έδειξε ακρίβεια 88.4% στις προβλέψεις της κλάσης της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος.

Διερεύνηση της συσχέτισης άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων με την ισχύ σήματος

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης διερευνήθηκε επιπλέον και η επίδραση της ατμοσφαιρικής υγρασίας, καθώς και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων, στην ισχύ του σήματος. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, αρχικά εφαρμόστηκε ένας κινητός μέσος όρος χρονικού παραθύρου 5 λεπτών στα δεδομένα RSSI. Στη συνέχεια, για κάθε τιμή του RSSI προσδιορίστηκε η εξασθένηση σήματος εκφρασμένη ως προς τη μέγιστη τιμή που είχε παρατηρηθεί συνολικά για το RSSI. Έπειτα, εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης σήματος, η οποία προέκυψε από περίπου 220000 μετρήσεις RSSI και διαφόρων

Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα

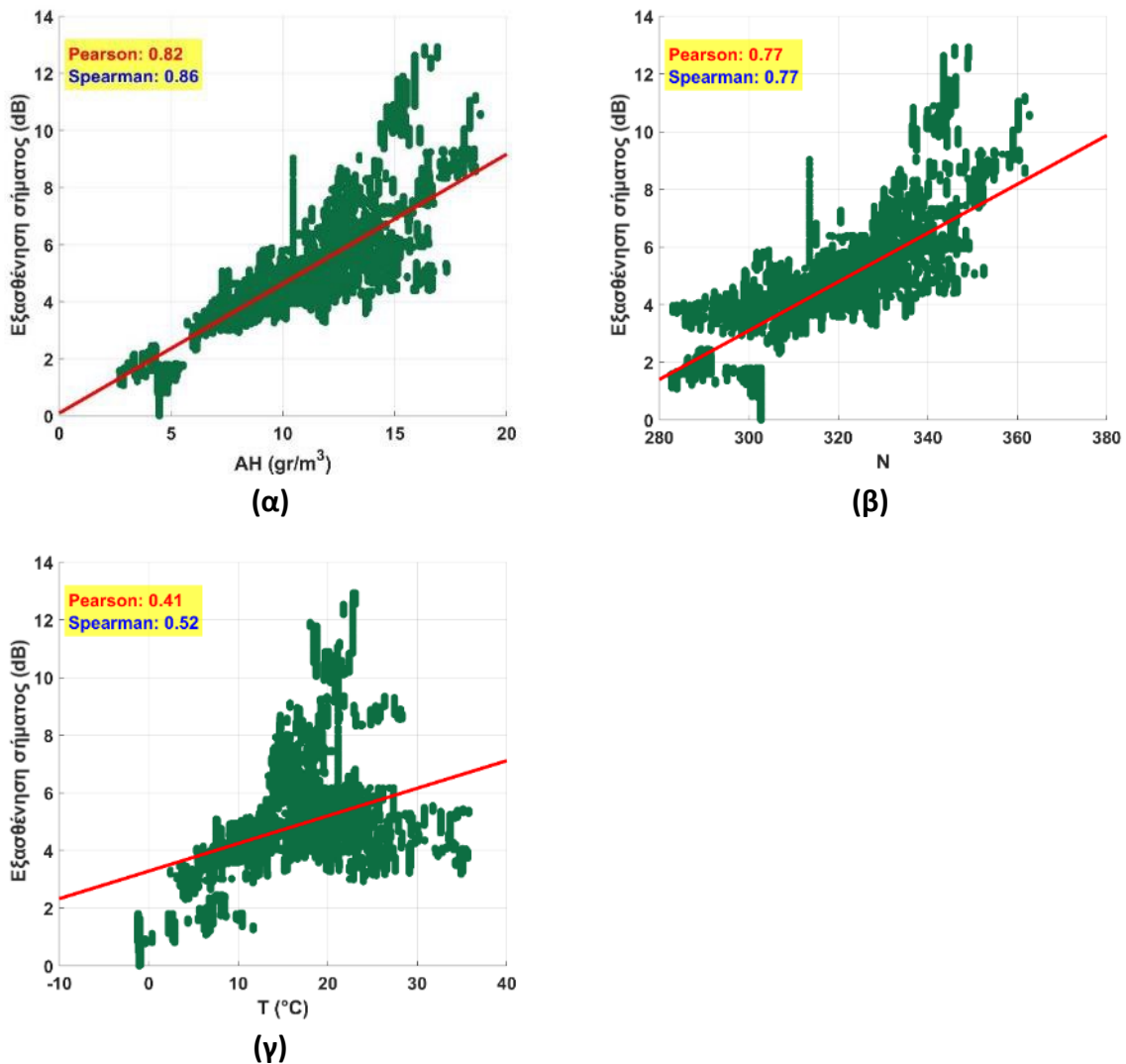
μετεωρολογικών παραμέτρων που ελήφθησαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία (T), τη σχετική υγρασία (RH), την απόλυτη υγρασία (AH), την ατμοσφαιρική πίεση (P) και τη ραδιο-διαθλαστικότητα του αέρα (N). Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζονται διαγράμματα για κάθε μία από τις εξεταζόμενες παραμέτρους σε σχέση με όλες τις άλλες παραμέτρους, οργανωμένα με τη μορφή ενός πίνακα συσχέτισης. Σε κάθε διάγραμμα, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης Spearman παρουσιάζεται με μπλε χρώμα.



Σχήμα 5.8: Γραφική αναπαράσταση, με τη μορφή πίνακα συσχέτισης, που απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας (T), της σχετικής υγρασίας (RH), της απόλυτης υγρασίας (AH), της ατμοσφαιρικής πίεσης (P), της ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα (N) και της απώλειας ισχύος. Οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης Pearson επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι συντελεστές συσχέτισης Spearman παρουσιάζονται με μπλε χρώμα.

Στο Σχήμα 5.8 υπάρχει μια αξιοσημείωτη συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της απόλυτης υγρασίας (AH). Είναι προφανές ότι η αύξηση της απόλυτης υγρασίας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση και της εξασθένησης σήματος. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson ανήλθε στο 0.82, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης Spearman δείχνει μια ελαφρώς ισχυρότερη συσχέτιση με μια τιμή 0.86, υποδεικνύοντας μια μονοτονική σχέση μεταξύ της ισχύος του σήματος και της απόλυτης υγρασίας. Μια άλλη σημαντική συσχέτιση παρατηρήθηκε μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα (N). Για άλλη μια φορά, η εξασθένηση σήματος αυξήθηκε με την αύξηση της ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα. Σε

αυτήν την περίπτωση, τόσο ο συντελεστής συσχέτισης Pearson όσο και ο συντελεστής Spearman ήταν 0.77. Τέλος, μια τιμή 0.52 για τον συντελεστή συσχέτισης Spearman υποδηλώνει ότι δεν μπορεί να αποκλειστεί μια πιθανή συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της θερμοκρασίας (T). Η συσχέτιση με τη θερμοκρασία ενδεχομένως να είναι έμμεση καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας η ατμόσφαιρα μπορεί να συγκρατεί περισσότερους υδρατμούς. Η αύξηση της μέγιστης τάσης υδρατμών (e_s) επιτρέπει μεγαλύτερες τιμές τόσο για την τάση υδρατμών (e) όσο και για την απόλυτη υγρασία (AH). Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μετεωρολογικές παραμέτρους, η εξασθένηση σήματος δεν παρουσίασε καμία άλλη σημαντική εμφανή συσχέτιση. Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται ξεχωριστά τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της απόλυτης υγρασίας, της ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.9: Γραφική απεικόνιση της εξασθένησης σήματος σε σχέση με **(α)** την απόλυτη υγρασία (AH), **(β)** τη ραδιο-διαθλαστικότητα του αέρα (N) και **(γ)** τη θερμοκρασία (T) και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης Pearson και Spearman.

Συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την παραπάνω μελέτη καθώς και τα βασικά συμπεράσματα είναι τα εξής:

1. Εφαρμογή κινητού μέσου όρου με χρονικό παράθυρο 5 λεπτών στα δεδομένα RSSI.
2. Διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της απόλυτης υγρασίας, της ατμοσφαιρικής πίεσης και της ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα.
3. Προφανής συσχέτιση μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της απόλυτης υγρασίας καθώς και της ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα.
4. Πιθανή συσχέτιση της εξασθένησης σήματος και με τη θερμοκρασία.

5.4 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης

Η συσχέτιση μεταξύ της έντασης της βροχής και της εξασθένησης σήματος διερευνήθηκε και μέσω μετρήσεων της ισχύος που έγιναν με την εξειδικευμένη πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ήταν δυνατή η συσχέτιση με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, καθώς αυτές απαιτούν δεδομένα από εκτεταμένα χρονικά διαστήματα, κάτι που ήταν δύσκολο διότι στην τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων υπήρχαν συχνά διάφορες διαταραχές, είτε λόγω εργασιών στο εξωτερικό των κτηρίων είτε λόγω της άνθησης και παρεμβολής της βλάστησης στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ πομπού και δέκτη. Η περίοδος διεξαγωγής των μετρήσεων ήταν από το δεύτερο μισό του Ιανουαρίου του 2024 έως και το τέλος Μαΐου του 2024.

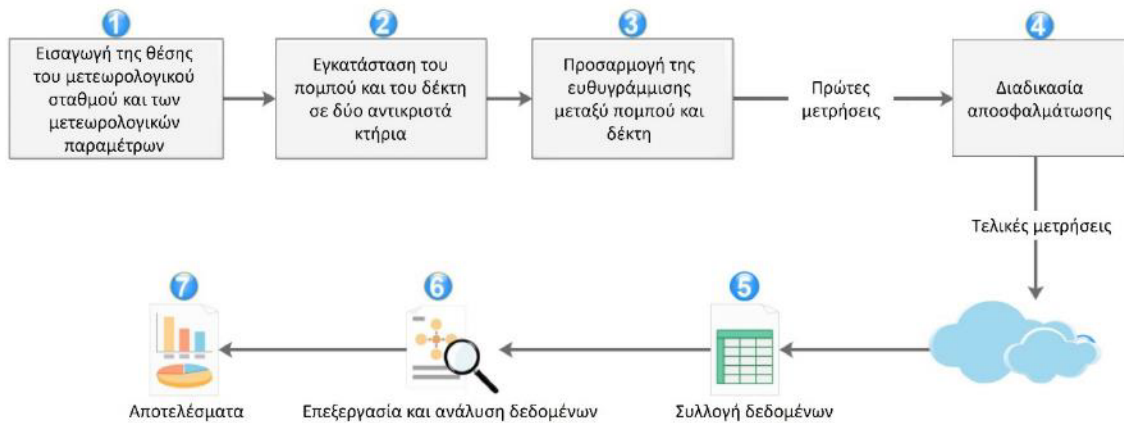
5.4.1 Τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων

Η τοποθεσία που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων βρίσκονταν στο Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Συγκεκριμένα, ο πομπός εγκαταστάθηκε στο κτήριο Φ3 του Τμήματος Φυσικής, ενώ ο δέκτης στο κτήριο Φ2. Καθώς τα δύο αυτά κτήρια είναι αντικριστά, το συγκεκριμένο πλάνο θεωρήθηκε κατάλληλο για τη διαδικασία καταγραφής δεδομένων ισχύος. Επιπλέον, η απόσταση των κτηρίων είναι 21.5 m, και μεταξύ των χώρων που τοποθετήθηκε ο πομπός και ο δέκτης δεν παρεμβάλλονταν πολλά εμπόδια, ενώ υπήρχε εύκολη πρόσβαση σε αυτούς. Η συγκεκριμένη τοποθεσία βρίσκεται επίσης κοντά στον μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, σε απόσταση 850 m, κάτι που είναι πολύ σημαντικό λόγω της υψηλής χωρικής μεταβλητότητας της βροχής.

Τις πρώτες μέρες των μετρήσεων προσδιορίστηκε η κατάλληλη τοποθέτηση του πομπού και του δέκτη για την οποία μεγιστοποιούνταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη, ώστε η όλη διάταξη να βρίσκεται με ασφάλεια εντός των ορίων ευαισθησίας του. Κατά το ίδιο διάστημα πραγματοποιήθηκε και μια γενικότερη αποσφαλμάτωση. Η σύντομη ροή εργασιών για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ισχύος φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 5.10.

5.4 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης

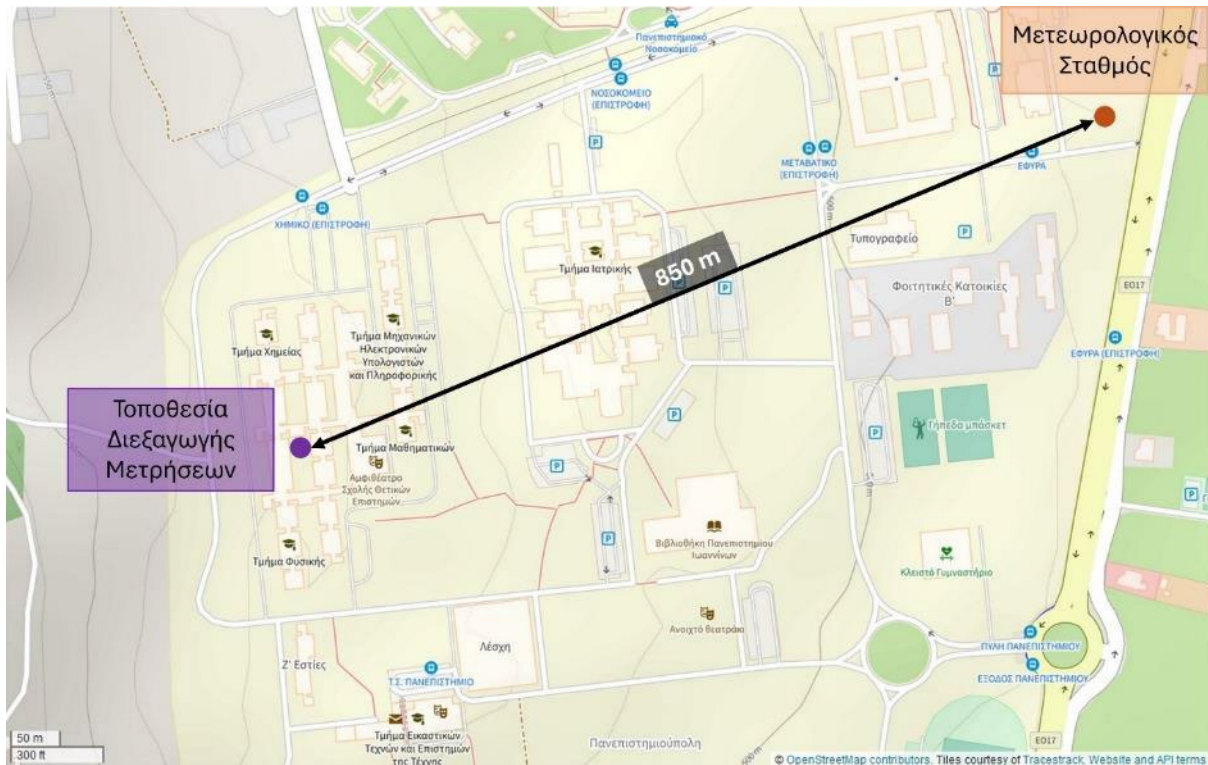
Στη σχηματική απεικόνιση του Σχήματος 5.11 φαίνεται η τοποθέτηση του πομπού (Tx) και του δέκτη (Rx). Έπειτα, στο Σχήμα 5.12 φαίνεται ένας χάρτης με ένα μέρος της πανεπιστημιούπολης του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, όπου εμπεριέχεται, μεταξύ άλλων, το Τμήμα Φυσικής και η τοποθεσία όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ισχύος σήματος, καθώς επίσης και η θέση του μετεωρολογικού σταθμού από όπου προέρχονταν οι μετρήσεις της έντασης της βροχής.



Σχήμα 5.10: Ροή εργασιών που ακολουθήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ισχύος σήματος μέσω του πομπού και του δέκτη της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε.



Σχήμα 5.11: Η τοποθέτηση του πομπού (Tx) και του δέκτη (Rx) στα κτήρια Φ2 και Φ3 του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

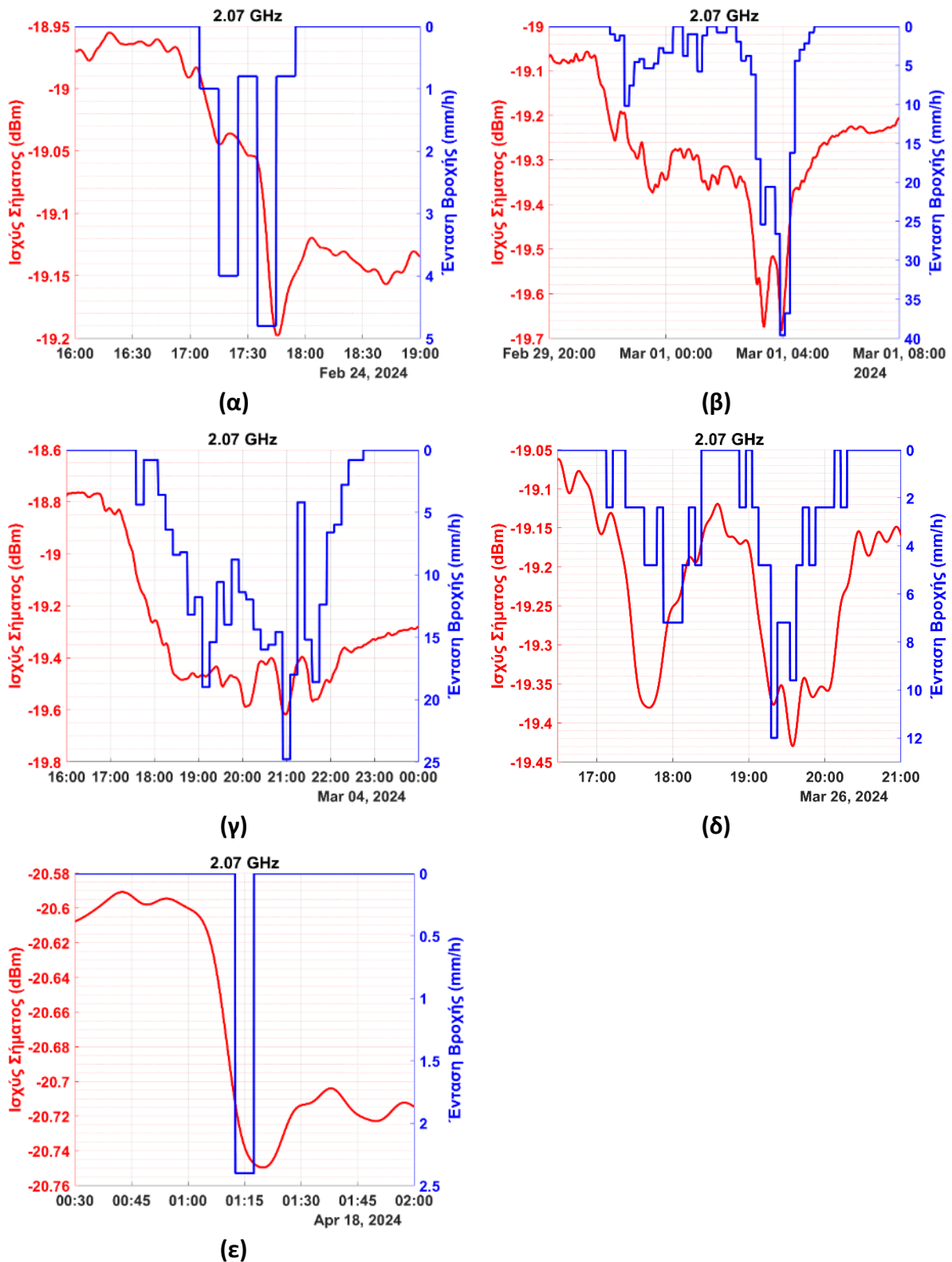


Σχήμα 5.12: Χάρτης ενός μέρους της πανεπιστημιούπολης του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ο οποίος περιλαμβάνει τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού καθώς και την τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων.

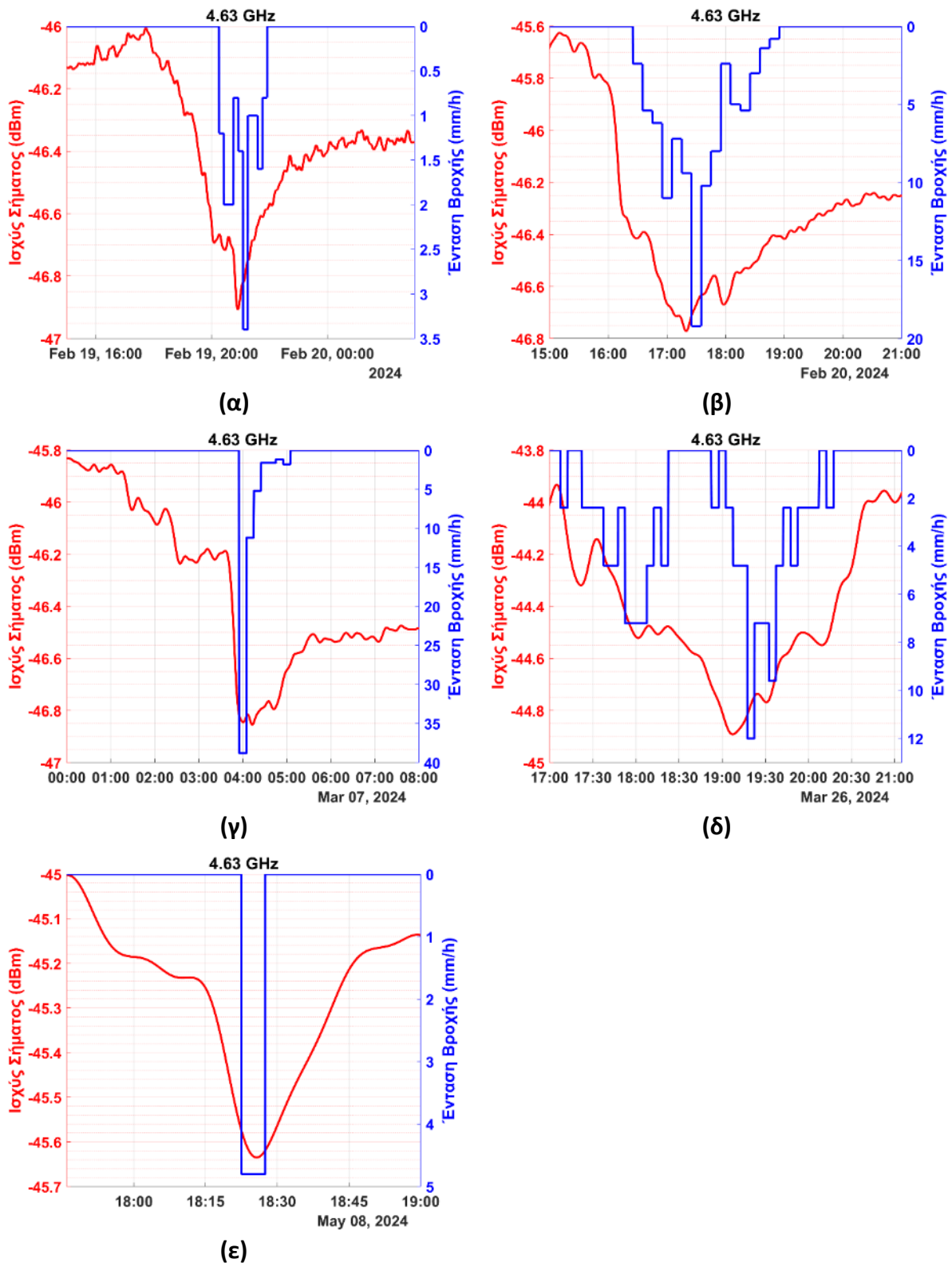
5.4.2 Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις ισχύος σήματος με την πειραματική διάταξη έγιναν για σήματα των τριών βασικών συχνοτήτων λειτουργίας του συστήματος πομπού και του συστήματος του δέκτη, δηλαδή 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Κάθε δευτερόλεπτο άλλαζε η συχνότητα εκπομπής του πομπού και ο δέκτης μετρούσε την αντίστοιχη ισχύ. Έτσι, για κάθε μια από τις τρεις συχνότητες ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν 3 δευτερόλεπτα. Σε αντιστοιχία με την Ενότητα 5.3.2, στο σύνολο των δεδομένων που συλλέχθηκαν εφαρμόστηκε ένας κινητός μέσος όρος, το χρονικό παράθυρο του οποίου ήταν και πάλι 5 λεπτά, όσο και ο χρόνος δειγματοληψίας της έντασης της βροχής. Στα Σχήματα 5.11, 5.12 και 5.13 φαίνονται, για τις τρεις αυτές συχνότητες αντίστοιχα, πέντε παραδείγματα από τη συμπεριφορά της ισχύος σήματος κατά την παρουσία βροχής. Ο άξονας της έντασης της βροχής είναι και πάλι αντεστραμμένος, με την τιμή των 0 mm/h να βρίσκεται στην κορυφή του, για ένα καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα όταν αντιπαραβάλλεται με τις μετρήσεις ισχύος σήματος.

5.4 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης

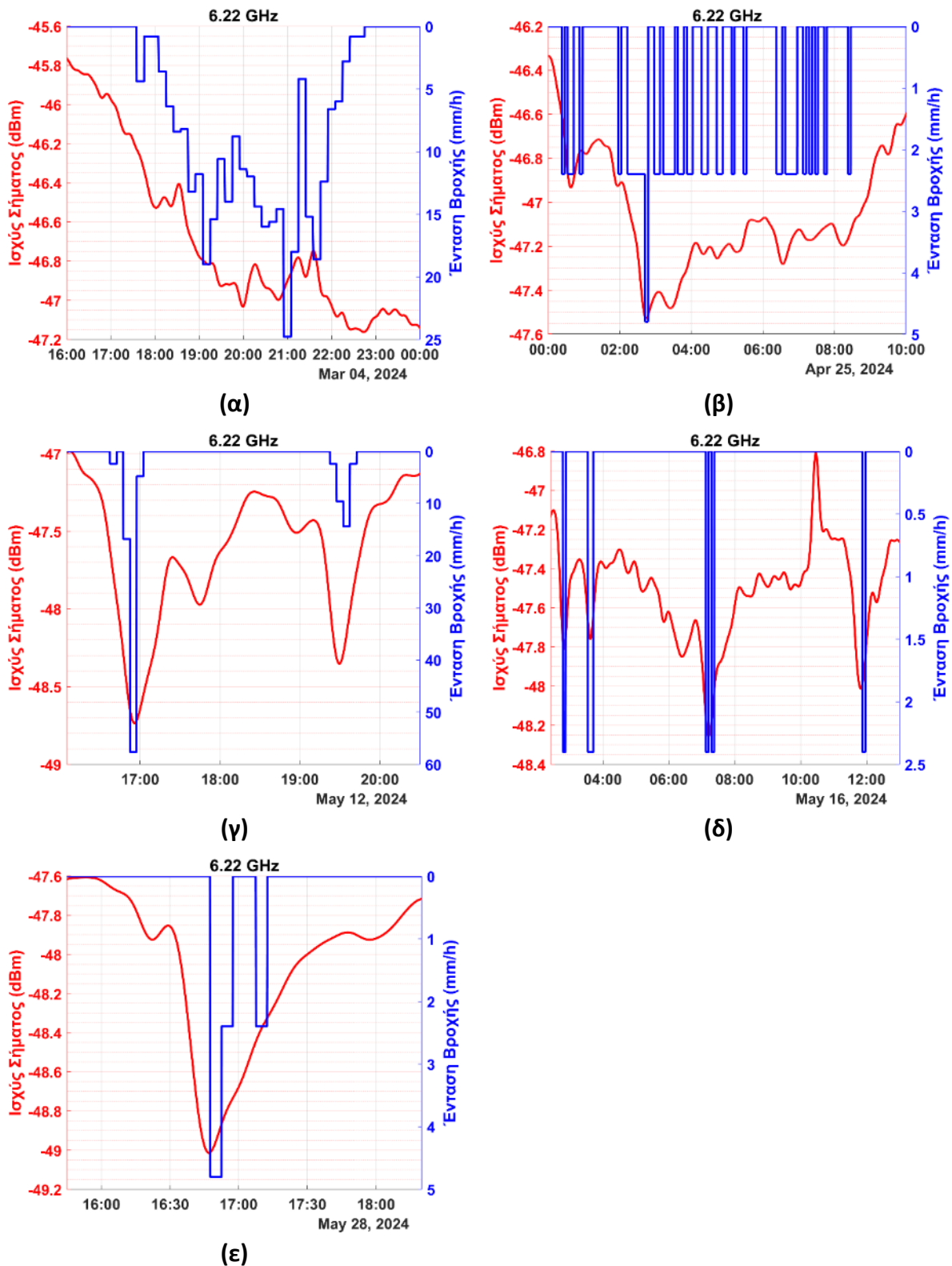


Σχήμα 5.13: Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος συχνότητας 2.07 GHz (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες **(α)** 24 Φεβρουαρίου 2024, **(β)** 29 Φεβρουαρίου με 1 Μαρτίου 2024, **(γ)** 4 Μαρτίου 2024, **(δ)** 26 Μαρτίου 2024 και **(ε)** 18 Απριλίου 2024.



Σχήμα 5.14: Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος συχνότητας 4.63 GHz (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες **(α)** 19 Φεβρουαρίου 2024, **(β)** 20 Φεβρουαρίου 2024, **(γ)** 7 Μαρτίου 2024, **(δ)** 26 Μαρτίου 2024 και **(ε)** 8 Μαΐου 2024.

5.4 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης



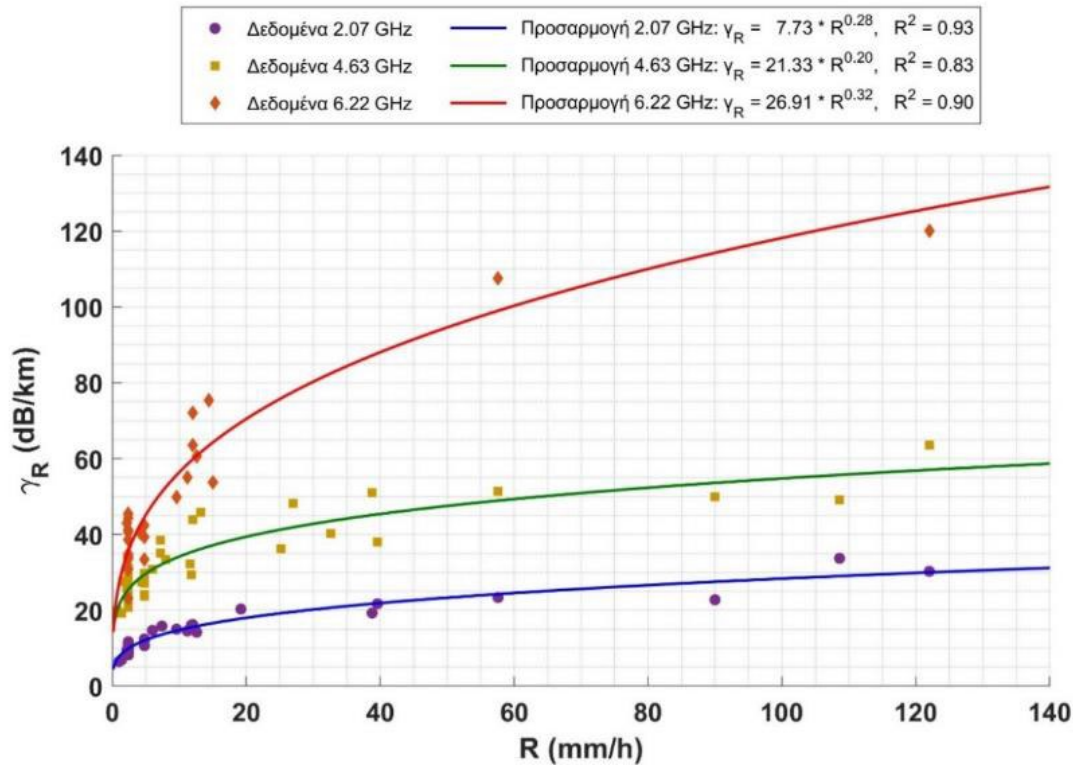
Σχήμα 5.15: Απεικόνιση πέντε περιπτώσεων βροχής (η έντασή της εκφράζεται σε mm/h, μπλε χρώμα) και η επίδρασή της στην ισχύ σήματος συχνότητας 6.22 GHz (εκφρασμένη σε dBm, κόκκινο χρώμα) για τις ημερομηνίες **(α)** 4 Μαρτίου 2024, **(β)** 25 Απριλίου 2024, **(γ)** 12 Μαΐου 2024, **(δ)** 16 Μαΐου 2024 και **(ε)** 28 Μαΐου 2024.

Τα παραδείγματα στα σχήματα των προηγούμενων σελίδων καταδεικνύουν την ικανότητα της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης του πομπού και του δέκτη να μετρά αποτελεσματικά την εξασθένηση του σήματος που προκαλείται από τη βροχή, ακόμα και στην περίπτωση του σήματος συχνότητας 2.07 GHz, για το οποίο εμφανίζεται ελάχιστη εξασθένηση κατά τη διάρκεια γεγονότων μικρής έντασης βροχής. Σε αρκετές περιπτώσεις η εξασθένηση για τη συγκεκριμένη συχνότητα ήταν κάτω του 0.1 dB, κάτι που υποδηλώνει πόσο σημαντική ήταν η μεγάλη ακρίβεια που διαθέτει ο δέκτης στις μετρήσεις ισχύος. Αντίθετα, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις, η παρατηρούμενη εξασθένηση είναι πιο έντονη για τα σήματα συχνότητας 4.63 και 6.22 GHz. Όπως και στις μετρήσεις της ενότητας 5.3.2 που έγιναν μέσω της εφαρμογής Android, φαίνεται πως με το πέρας της βροχής σε πολλές περιπτώσεις το σήμα δεν επιστρέφει αμέσως στα αρχικά του, προ-βροχής επίπεδα. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.3.2 τη συγκεκριμένη συμπεριφορά θα μπορούσε να αιτιολογήσει η παραμονή αυξημένης υγρασίας στην ατμόσφαιρα κατά το διάστημα μετά τη βροχή. Επιπλέον, παρατηρήθηκε γενικά πως, σε σύγκριση με τα 2.07 GHz, οι δύο ανώτερες συχνότητες εμφάνιζαν μειωμένη σταθερότητα του σήματος, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στο μικρότερό τους μήκος κύματος, το οποίο καθιστά το σήμα ευάλωτο σε φαινόμενα σκέδασης από τα γύρω εμπόδια της περιοχής όπου έγιναν οι μετρήσεις. Παρ' όλα αυτά, η εξασθένηση σήματος λόγω της βροχής παραμένει ανιχνεύσιμη και υπολογίσιμη στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία και όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, μεταξύ της έντασης της βροχής (R) και της ειδικής εξασθένησης σήματος λόγω της βροχής (γ_R) η οποία εκφράζεται σε dB/km, ικανοποιείται μια εμπειρική σχέση δύναμης της γενικής μορφής (1.33). Έτσι, επιλέχθηκε η προσαρμογή μιας καμπύλης της μορφής αυτής σε ένα σύνολο δεδομένων εξασθένησης σήματος τα οποία συγκεντρώθηκαν για κάθε συχνότητα. Για τη συγκέντρωση των συγκεκριμένων δεδομένων εξετάστηκαν διάφορα γεγονότα βροχής σαν κι αυτά που παρουσιάστηκαν ως παραδείγματα προηγουμένως στα Σχήματα 5.13, 5.14 και 5.15. Η εξασθένηση σήματος υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης ισχύος του σήματος κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχής και της μέσης τιμής της ισχύος του σήματος κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πριν την εμφάνιση της βροχής, κατά την οποία το σήμα δεν εμφάνιζε σημαντικές διακυμάνσεις. Όλες οι σχετικές χρονικές περίοδοι που εξετάστηκαν στη διαδικασία υπολογισμού της εξασθένησης ορίστηκαν ώστε το χρονικό τους εύρος να ανέρχεται το πολύ σε 4 ώρες πριν από την εμφάνιση της βροχής, και μέχρι την στιγμή της έναρξης αυτής. Το σύνολο των δεδομένων εξασθένησης που υπολογίστηκαν με τον τρόπο αυτόν μετατράπηκαν τελικά σε δεδομένα ειδικής εξασθένησης, δηλαδή μετατράπηκαν από τις αρχικές τους μονάδες που ήταν dB/21.5m, σε dB/km όπως εκφράζεται η ειδική εξασθένηση λόγω της βροχής. Η μετατροπή αυτή έγινε πολλαπλασιάζοντας την υπολογισμένη εξασθένηση με την τιμή 46.51 (1 km/21.5 m). Μέσω της προσαρμογής της καμπύλης του νόμου δύναμης (1.33) στις πειραματικές μετρήσεις της εξασθένησης σήματος κάθε συχνότητας, προσδιορίστηκε για τις τρεις περιπτώσεις η τιμή της σταθεράς a , καθώς και του

5.4 Πειραματικές μετρήσεις μέσω της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης

εκθέτη b της σχέσης αυτής. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής των τριών καμπυλών στα δεδομένα ειδικής εξασθένησης ακολουθούν στο Σχήμα 5.16, όπου περιλαμβάνεται επίσης και η σχέση δύναμης που προέκυψε για κάθε μια από τις καμπύλες, με τις τιμές των συντελεστών a και b , αλλά και του συντελεστή προσδιορισμού R^2 .



Σχήμα 5.16: Δεδομένα ειδικής εξασθένησης λόγω της βροχής και προσαρμογή σε κάθε περίπτωση μιας καμπύλης του νόμου δύναμης (1.33) για τις συχνότητες των 2.07, 4.63 και 6.22 GHz.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.16, οι συντελεστές a και b όπως ορίζονται από τα αποτελέσματα της προσαρμογής είναι, αντίστοιχα, 7.73 και 0.28 για τη συχνότητα 2.07 GHz, 21.33 και 0.20 για τη συχνότητα 4.63 GHz, καθώς και 26.91 και 0.32 για τη συχνότητα 6.22 GHz. Ο αντίστοιχος συντελεστής προσδιορισμού σε κάθε περίπτωση είναι 0.93, 0.83 και 0.90, υποδεικνύοντας ισχυρή συσχέτιση υπό τη μορφή νόμου δύναμης μεταξύ της εξασθένησης σήματος και της έντασης της βροχής και στις τρεις περιπτώσεις. Επιπλέον, τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν ότι η εξασθένηση αυξάνεται με τη συχνότητα. Φαίνεται πως είναι χαμηλότερη στα 2.07 GHz και υψηλότερη στα 6.22 GHz. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς με την αύξηση της συχνότητας το μήκος κύματος μειώνεται, πλησιάζοντας τις διαστάσεις των σταγόνων βροχής, κάτι που καθιστά το σήμα περισσότερο επιρρεπές σε απορρόφηση και σκέδαση σε σύγκριση με σήματα με μεγαλύτερα μήκη κύματος. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Τιμές των συντελεστών της σχέσης (1.33), της τυπικής απόκλισης (σ) για κάθε έναν από αυτούς, καθώς και του συντελεστή προσδιορισμού (R^2), όπως προέκυψαν από την προσαρμογή της καμπύλης που περιγράφει η σχέση αυτή στα δεδομένα κάθε συχνότητας.

Συχνότητα (GHz)	a	b	σ_a	σ_b	R^2
2.07	7.73	0.28	0.73	0.03	0.93
4.63	21.33	0.20	2.05	0.03	0.83
6.22	26.91	0.32	3.17	0.04	0.90

Συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη μελέτη που παρουσιάστηκε στην παρούσα ενότητα και οι βασικές παρατηρήσεις ήταν:

1. Διεξαγωγή μετρήσεων της ισχύος σήματος για συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz μεταξύ Ιανουαρίου και Μαΐου του 2024, για 4.5 μήνες.
2. Εφαρμογή κινητού μέσου όρου με χρονικό παράθυρο 5 λεπτών στα δεδομένα ισχύος.
3. Τα αποτελέσματα για διάφορα γεγονότα βροχής έδειξαν εξασθένηση του σήματος, η οποία αυξάνονταν με τη συχνότητα.
4. Με το πέρας της βροχής η ισχύς σήματος δεν επανέρχονταν στα αρχικά της επίπεδα, πιθανότατα λόγω της αυξημένης υγρασίας που παρέμενε στον αέρα.
5. Υπολογίζοντας για κάθε συχνότητα την εξασθένηση σε διάφορα γεγονότα βροχής και ύστερα προσαρμόζοντας καμπύλες νόμου δύναμης στα δεδομένα, προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, με τον συντελεστή προσδιορισμού να είναι σε κάθε περίπτωση 0.93, 0.83 και 0.90 για συχνότητες 2.07, 4.63 και 6.22 GHz αντίστοιχα.

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν αρχίσει να γίνονται περισσότερο εμφανείς κατά τα τελευταία χρόνια με την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και περιβαλλοντικών καταστροφών. Η βροχή, ως μια από τις βασικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους, διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στα ακραία καιρικά φαινόμενα, επομένως πληροφορίες σχετικές με αυτήν αλλά και άλλων παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας. Επιπλέον, μετρήσεις της βροχής είναι κρίσιμες γενικότερα για την αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων, των πλημμυρών, καθώς και για τον πολεοδομικό σχεδιασμό, για πληθώρα προγνωστικών μοντέλων, τις κλιματικές μελέτες κλπ. Οι καθιερωμένες μέθοδοι μέτρησης της βροχής διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα, η καθεμιά με τον δικό της τρόπο, ωστόσο παρουσιάζουν και κάποιους περιορισμούς. Σε πολλές περιπτώσεις οι περιορισμοί τους σχετίζονται με την υψηλή τόσο χωρική όσο και χρονική μεταβλητότητα της βροχής.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές ερευνητικές προσπάθειες εκτίμησης της έντασης της βροχής χρησιμοποιώντας μια νέα προσέγγιση, μέσω της μέτρησης της εξασθένησης σήματος λόγω της βροχής σε μικροκυματικές ζεύξεις που χρησιμοποιούνται για τις τηλεπικοινωνίες. Το βασικότερο ίσως πλεονεκτήματα που θα μπορούσαν να προσφέρουν αυτές οι ζεύξεις είναι η πανταχού παρουσία τους. Με τις επικοινωνίες να είναι αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας κάθε ανθρώπου, οι απαραίτητοι σταθμοί βάσης πομποδεκτών βρίθουν σε κάθε γωνιά του πολιτισμού. Κατά συνέπεια, η επίτευξη αξιόπιστων εκτιμήσεων της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος, συμπληρωματικά με τις συμβατικές μεθόδους μέτρησης και την αλληλοϋποστήριξη μεταξύ όλων τους, θα μπορούσε να αντιμετωπίσει σε έναν πολύ μεγάλο βαθμό το πρόβλημα της χωρικής μεταβλητότητάς της. Αντίστοιχα θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί και το πρόβλημα της χρονικής μεταβλητότητας της βροχής, καθώς οι μετρήσεις ισχύος σε τέτοιες ζεύξεις μπορούν να γίνονται σε πραγματικό χρόνο. Η εξασθένηση που προκαλεί η βροχή στην ισχύ σήματος είναι άμεση και το ίδιο άμεση μπορεί να είναι και η μέτρηση της πρώτης, και κατ' επέκταση και η εκτίμηση της δεύτερης. Παράλληλα, λόγω της ήδη ύπαρξης της υποδομής τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων, η υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου θα ήταν γενικά εύκολη, γρήγορη και χωρίς την ανάγκη κάποιου σημαντικού κόστους εγκατάστασης νέου εξοπλισμού.

Η πλειοψηφία των μελετών εκτίμησης της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος αφορά κυρίως δεδομένα από μικροκυματικές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες ανώτερες των 10 GHz, καθώς σε χαμηλότερες τιμές συχνότητας η εξασθένηση

είναι μικρότερη και επομένως πιο δύσκολο να ανιχνευτεί. Γενικά, οι συγκεκριμένες μελέτες έχουν εστιάσει σε δεδομένα από μια ζεύξη ή μέχρι και αρκετές χιλιάδες. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν κατασκευαστεί χάρτες βροχής με πολύ καλά αποτελέσματα, συστήματα συναγερμού για την έγκαιρη ειδοποίηση όσον αφορά καταστροφές, καθώς επίσης έχουν εκπαιδευτεί και μοντέλα μηχανικής μάθησης για την κατηγοριοποίηση της έντασης της βροχής με βάση την εξασθένηση σήματος. Άλλες μελέτες έχουν ασχοληθεί και με τις δυσκολίες που μπορεί να συναντώνται κατά τις εκτιμήσεις με τη συγκεκριμένη μέθοδο, όπως η επίδραση που έχει το συσσωρευμένο νερό στην επιφάνεια μιας βρεγμένης κεραίας, οι αναταράξεις αυτής λόγω ανέμων, η περιορισμένη ακρίβεια στις μετρήσεις ισχύος σε πολλές περιπτώσεις, η παρεμβολή εμποδίων κατά μήκος μιας ζεύξης κλπ.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιδίωξε να συνεισφέρει στο συγκεκριμένο αντικείμενο μέσω πειραματικών μετρήσεων εξασθένησης σήματος και της συσχέτισης με την ένταση της βροχής για συχνότητες κάτω των 10 GHz, όπου έχουν διεξαχθεί ελάχιστες σχετικές έρευνες, και στις οποίες απαντώνται πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Για τον σκοπό αυτόν αναπτύχθηκε μια εφαρμογή Android για την καταγραφή της ισχύος λαμβανόμενου σήματος (RSSI) από μια κινητή συσκευή. Υλοποιήθηκε επίσης μια εξειδικευμένη και υψηλής ακρίβειας πειραματική διάταξη για την διεξαγωγή επιπλέον μετρήσεων. Οι συχνότητες που μελετήθηκαν ήταν συγκεκριμένα 2630 MHz μέσω της εφαρμογής Android, και 2.07, 4.63 και 6.22 GHz, μέσω της εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης.

Η εφαρμογή Android σχεδιάστηκε ώστε να εμφανίζει πληροφορίες για το RSSI στη ζεύξη μεταξύ ενός σταθμού βάσης και μιας κινητής συσκευής στην οποία έτρεχε. Παράλληλα εμφάνιζε και άλλες πληροφορίες που ήταν απαραίτητες για τον προσδιορισμό τόσο της συχνότητας της επικοινωνίας όσο και της θέσης του σταθμού βάσης. Έπειτα από επιλογή του χρήστη, όλες αυτές οι πληροφορίες αποθηκεύονταν στην εσωτερική μνήμη της κινητής συσκευής σε αρχεία κειμένου κάθε 10 δευτερόλεπτα. Η λειτουργία αυτή υλοποιήθηκε ως υπηρεσία προσκηνίου (foreground service) ώστε να μπορεί η εφαρμογή να καταγράφει δεδομένα ανεμπόδιστη για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. Κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων η συσκευή στην οποία εγκαταστάθηκε η εφαρμογή έτρεχε Android 8 και επέτρεπε ακρίβεια 1 dB στις μετρήσεις RSSI. Η συσκευή τοποθετήθηκε στην περιοχή της Πεδινής Ιωαννίνων, σε απόσταση 228 μέτρα από τον σταθμό βάσης με τον οποίο σχημάτιζε ζεύξη και ο οποίος βρισκόταν σε απόσταση 1.5 km από τον μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Η περίοδος των μετρήσεων ήταν διάρκειας σχεδόν 7 μηνών. Η εξασθένηση σήματος συγκρίθηκε αρχικά με την ένταση της βροχής. Η ακρίβεια 1 dB στις μετρήσεις δεν ήταν αρκετή για την ακριβή εκτίμηση της έντασης της βροχής. Έτσι επιλέχθηκε μια προσέγγιση ταξινόμησης. Η ένταση της βροχής κατηγοριοποιήθηκε σε πέντε κλάσεις, και τα δεδομένα εξασθένησης σήματος χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση κάποιων μοντέλων μηχανικής μάθησης. Τα καλύτερα αποτελέσματα, ως προς την πρόβλεψη της σωστής κλάσης για την ένταση της βροχής μέσω της εξασθένησης σήματος, έδειξε ένα μοντέλο βασισμένο σε δέντρο αποφάσεων. Η συνολική του ακρίβεια στις προβλέψεις ήταν

88.4%. Επιπλέον εξετάστηκε και η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ της εξασθένησης σήματος και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων. Παρατηρήθηκε συσχέτιση της εξασθένησης με την απόλυτη υγρασία και τον δείκτη ραδιο-διαθλαστικότητας του αέρα, όπως υπέδειξαν οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης Pearson και Spearman, οι οποίοι στην πρώτη περίπτωση ήταν αντίστοιχα 0.82 και 0.86, ενώ στη δεύτερη ήταν 0.77 και ίσοι μεταξύ τους. Πιθανή συσχέτιση παρατηρήθηκε και με τη θερμοκρασία όπου οι συντελεστές αυτοί βρέθηκαν 0.41 και 0.52.

Η εφαρμογή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά και για επιπλέον μετρήσεις και σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με τον σχηματισμό ζεύξης της κινητής συσκευής και με άλλους σταθμούς βάσης σε διαφορετικές τοποθεσίες. Επίσης, η εφαρμογή μπορεί να επεκταθεί ώστε να υποστηρίζει και μετρήσεις εντός του δικτύου 5G σε νεότερες κινητές συσκευές. Ένας ακόμα παράγοντας που μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των μετρήσεων είναι αν αυτές διεξαχθούν κοντά στον μετεωρολογικό σταθμό καθώς, λόγω της μεγάλης χωρικής μεταβλητότητας της βροχής, οι μετρήσεις της έντασης της βροχής μπορεί να μην είναι ακριβείς για μεγάλες αποστάσεις από τον μετεωρολογικό σταθμό. Επιπλέον, η χρήση πιο προηγμένων μοντέλων μηχανικής μάθησης ίσως να μπορούσε να επιτύχει υψηλότερη ακρίβεια στην κατηγοριοποίηση της έντασης της βροχής.

Επιπρόσθετες μετρήσεις εξασθένησης σήματος έγιναν και με την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε. Η διάταξη αποτελούνταν από έναν πομπό και έναν υψηλής ακρίβειας δέκτη, με την όλη λειτουργία να ελέγχεται από έναν μικροϋπολογιστή Raspberry Pi και στις δύο περιπτώσεις. Ο πομπός μπορούσε συνολικά να καλύψει συχνότητες από 1.9 έως 2.1 GHz, από 4.2 έως 4.8 GHz και από 5.6 έως 6.6 GHz. Ο δέκτης μπορούσε να καλύψει συχνότητες από 1.96 έως 2.36 GHz και από 4.04 έως 6.5 GHz, με χρήση της κατάλληλης κεραίας. Για τον δέκτη σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια επαναπροσδιοριζόμενη κεραία μικροταινίας. Μέσω της εφαρμογής τριών διαφορετικών τάσεων μικρότερων των 900 mV στα άκρα μιας διόδου PIN στην κεραία, ορίστηκαν τρεις τρόποι λειτουργίας κατά τους οποίους βελτιστοποιούνταν η αποδοτικότητα της κεραίας στους βασικούς συντονισμούς των 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Αυτές οι συχνότητες επιλέχθηκαν και για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Ο πομπός και ο δέκτης επικοινωνούσαν μεταξύ τους μέσω μηνυμάτων για τη μετάβαση από τη μια συχνότητα στην άλλη και την καταγραφή της αντίστοιχης ισχύος σήματος, η οποία αποθηκεύονταν τόσο τοπικά στον δέκτη σε αρχεία κειμένου όσο και σε μια απομακρυσμένη βάση δεδομένων. Η εναλλαγή από τη μια συχνότητα στην άλλη πραγματοποιούνταν κάθε δευτερόλεπτο. Για τις μετρήσεις ο πομπός και ο δέκτης τοποθετήθηκαν σε δύο αντικριστά κτήρια του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, με την μεταξύ τους απόσταση να είναι 21.5 m, ενώ η απόσταση από τον μετεωρολογικό σταθμό ήταν 850 m. Στην περίπτωση των μετρήσεων με την πειραματική διάταξη η ακρίβεια ήταν αρκετή για τον προσδιορισμό μιας ακριβούς σχέσης μεταξύ εξασθένησης σήματος και έντασης της βροχής. Στα δεδομένα που συλλέχθηκαν για μια περίοδο 4.5 μηνών, προσαρμόστηκε μια καμπύλη νόμου δύναμης όπως προτείνεται από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Για τις τρεις συχνότητες που εξετάστηκαν, 2.07, 4.63 και 6.22 GHz, οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού (R^2) ήταν ικανοποιητικές, συγκεκριμένα 0.93, 0.83 και 0.90 αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε επίσης η

αναμενόμενη συμπεριφορά πως με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται και η εξασθένηση σήματος λόγω της βροχής.

Μελλοντικά, η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιπλέον μετρήσεις και σε περισσότερες συχνότητες. Και σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν ωφέλιμο να γίνουν μετρήσεις πιο κοντά στον μετεωρολογικό σταθμό, και γενικά για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Όσο περισσότερα τα συλλεγμένα δεδομένα τόσο πιο αξιόπιστη θα ήταν και η σχέση που προκύπτει μέσω αυτών με την προσαρμογή της κατάλληλης καμπύλης. Τέλος, μέσα από μετρήσεις εξασθένησης σήματος σε κάποιο διαφορετικό σημείο όπου το περιβάλλον μεταξύ πομπού και δέκτη να παραμένει γενικά αμετάβλητο για μεγάλα χρονικά διαστήματα, θα υπήρχε η δυνατότητα διερεύνησης της συσχέτισης μεταξύ της εξασθένησης σήματος και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων, πέραν της βροχής.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Αριθμός Καναλιού και Συχνότητα Φέροντος σε μια Ζεύξη 4G/LTE

Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 2.4.1, σε κάθε ζεύξη μιας κινητής συσκευής και ενός σταθμού βάσης του δικτύου 4G/LTE αντιστοιχεί ένας αριθμός EARFCN. Για τον προσδιορισμό της συχνότητας φέροντος κατά τη λήψη (downlink) ή την εκπομπή (uplink) μπορεί μέσω της τιμής του EARFCN να προσδιοριστεί η περιοχή συχνοτήτων από την πρώτη στήλη του Πίνακα A.1 [103] που ακολουθεί, και οι τιμές των άλλων μεταβλητών του πίνακα που αντιστοιχούν σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων να εισαχθούν στην εξίσωση (2.1) ή (2.2) για τον υπολογισμό της συχνότητας λήψης ή εκπομπής αντίστοιχα. Στον πίνακα, ο αριθμός EARFCN αναγράφεται αντίστοιχα ως N_{DL} ή N_{UL} .

Πίνακας A.1: Πίνακας καναλιών E-UTRA του δικτύου 4G/LTE για τον προσδιορισμό της συχνότητας φέροντος κατά τη λήψη (downlink) ή την εκπομπή (uplink) δεδομένων, όπως ορίζεται στην τεχνική προδιαγραφή 3GPP TS 31.101.

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F _{DL_low} (MHz)	N _{offs-DL}	Range of N _{DL}	F _{UL_low} (MHz)	N _{offs-UL}	Range of N _{UL}
1	2110	0	0 - 599	1920	18000	18000 - 18599
2	1930	600	600 - 1199	1850	18600	18600 - 19199
3	1805	1200	1200 - 1949	1710	19200	19200 - 19949
4	2110	1950	1950 - 2399	1710	19950	19950 - 20399
5	869	2400	2400 - 2649	824	20400	20400 - 20649
6	875	2650	2650 - 2749	830	20650	20650 - 20749
7	2620	2750	2750 - 3449	2500	20750	20750 - 21449
8	925	3450	3450 - 3799	880	21450	21450 - 21799

Πίνακας Α.1 (Συνέχεια).

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F _{DL_low} (MHz)	N _{Offs-DL}	Range of N _{DL}	F _{UL_low} (MHz)	N _{Offs-UL}	Range of N _{UL}
9	1844.9	3800	3800 - 4149	1749.9	21800	21800 - 22149
10	2110	4150	4150 - 4749	1710	22150	22150 - 22749
11	1475.9	4750	4750 - 4999	1427.9	22750	22750 - 22999
12	728	5000	5000 - 5179	698	23000	23000 - 23179
13	746	5180	5180 - 5279	777	23180	23180 - 23279
14	758	5280	5280 - 5379	788	23280	23280 - 23379
17	734	5730	5730 - 5849	704	23730	23730 - 23849
33	1900	36000	36000 - 36199	1900	36000	36000 - 36199
34	2010	36200	36200 - 36349	2010	36200	36200 - 36349
35	1850	36350	36350 - 36949	1850	36350	36350 - 36949
36	1930	36950	36950 - 37549	1930	36950	36950 - 37549
37	1910	37550	37550 - 37749	1910	37550	37550 - 37749
38	2570	37750	37750 - 38249	2570	37750	37750 - 38249
39	1880	38250	38250 - 38649	1880	38250	38250 - 38649
40	2300	38650	38650 - 39649	2300	38650	38650 - 39649

Η Σειριακή Περιφερειακή Διεπαφή (SPI)

Απαραίτητοι για την πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής και η οποία περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, ήταν ένας μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC, Analog to Digital Converter), καθώς και ένας μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC, Digital to Analog Converter). Για την επικοινωνία του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi με τον ADC αλλά και με τον DAC, χρησιμοποιήθηκε η σειριακή περιφερειακή διεπαφή που διαθέτει ο μικροϋπολογιστής.

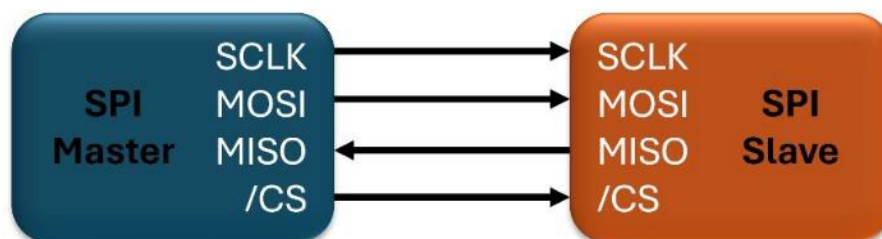
Η σειριακή περιφερειακή διεπαφή (SPI, Serial Peripheral Interface), η οποία συχνά συναντάται και με την ονομασία "four-wire", προήλθε από τη Motorola τη δεκαετία του 1980. Είναι δημοφιλής για την επικοινωνία μικροελεγκτών με διάφορες περιφερειακές συσκευές, όπως για παράδειγμα καταχωρητές ολίσθησης (shift registers), διαφόρων ειδών αισθητήρες, ολοκληρωμένα κυκλώματα ADC και DAC όπως και στην παρούσα διδακτορική διατριβή, οθόνες LCD, κάρτες μνήμης και αμέτρητες ακόμα συσκευές. Δεν ενδείκνυται για χρήση στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι μεγάλη, παρά μόνο για συσκευές που βρίσκονται πάνω στην ίδια ηλεκτρονική πλακέτα ή γενικά σε παραπλήσιες μικρές αποστάσεις. Ο λόγος είναι η σημαντική πτώση του ρυθμού δεδομένων με την αύξηση της απόστασης. Όταν η χρήση του SPI γίνεται σε μικρές αποστάσεις είναι δυνατή η επίτευξη ταχυτήτων που ξεπερνούν τα 10 Mbps. Η επικοινωνία μέσω του SPI είναι σειριακή, σύγχρονη και πλήρως αμφίδρομη. Επιπλέον, το SPI χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική master-slave, με μια μοναδική συσκευή να έχει τον ρόλο του master και να συντονίζει την επικοινωνία με διάφορες άλλες συσκευές κάθε μια εκ των οποίων αποτελεί έναν slave. Όπως υποδηλώνει και η εναλλακτική ονομασία "four-wire", το SPI είναι ένας δίαυλος που χρησιμοποιεί τέσσερα καλώδια ή γραμμές μεταφοράς. Από αυτές, δύο μεταφέρουν σήματα ελέγχου τα οποία ονομάζονται συγκεκριμένα SCLK και CS, και δύο μεταφέρουν σήματα δεδομένων τα οποία καλούνται MOSI και MISO. Πιο συγκεκριμένα, τα σήματα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών μέσω του SPI είναι:

- Το σήμα Serial Clock (SCLK ή SCK). Έτσι ονομάζεται ένα σήμα ρολογιού το οποίο παράγεται από τον master και έχει ως προορισμό τους slaves. Όλοι οι slaves που βρίσκονται συνδεδεμένοι στο SPI μοιράζονται την ίδια γραμμή SCLK. Το σήμα SCLK χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό της επικοινωνίας, καθώς μέσω αυτού καθορίζεται ο ρυθμός δειγματοληψίας των δεδομένων από τον παραλήπτη τους. Ο

παραλήπτης των δεδομένων τα διαβάζει bit προς bit, είτε σε κάθε ανοδικό είτε σε κάθε καθοδικό μέτωπο του παλμού του ρολογιού. Η πληροφορία σχετικά με το ποιο μέτωπο του παλμού του ρολογιού χρησιμοποιείται για την ανάγνωση του κάθε bit αναγράφεται στα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών της κάθε συσκευής. Το ίδιο ισχύει και για τη μέγιστη συχνότητα ρολογιού που μπορεί να υποστηριχθεί από τη συσκευή.

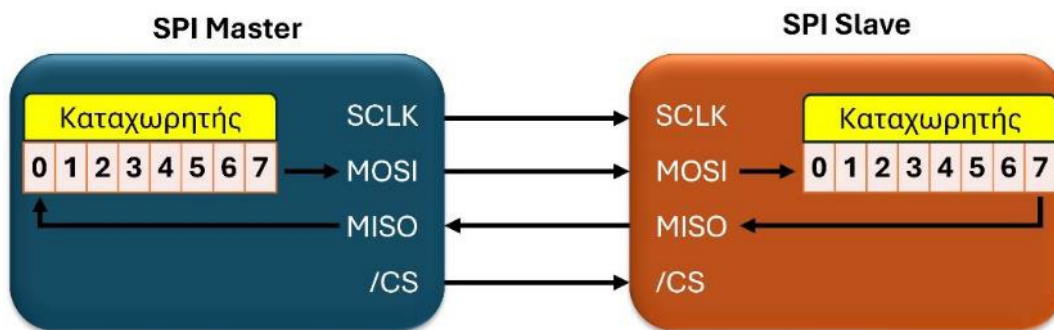
- Το σήμα Chip Select (CS), ή, όπως είναι μια εναλλακτική του ονομασία, Slave Select (SS). Είναι ένα σήμα παραγόμενο από τον master, σκοπός του οποίου είναι η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση μιας συγκεκριμένης συσκευής slave για την έναρξη ή τον τερματισμό της λήψης δεδομένων από αυτήν. Συνήθως το σήμα CS είναι active low, επομένως η διαδικασία λήψης δεδομένων ξεκινάει όταν ο master στείλει ένα λογικό 0 επιλέγοντας κάποια από τις συνδεδεμένες συσκευές, και η λήψη τερματίζεται όταν ο master στείλει ένα λογικό 1 στη γραμμή CS. Για τον λόγο αυτόν, η γραμμή CS αναγράφεται συνήθως ως \overline{CS} ή /CS.
- Το σήμα Master Out Slave In (MOSI). Είναι ένα σήμα που περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα που αποστέλλονται από την συσκευή master με κατεύθυνση κάποια από τις συσκευές slave.
- Το σήμα Master In Slave Out (MISO). Είναι ένα σήμα που περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα που αποστέλλονται από κάποια από τις συσκευές slave με κατεύθυνση τη συσκευή master.

Σε πολλές περιπτώσεις η αποστολή δεδομένων από κάποια συσκευή slave προς τη συσκευή master είναι περιττή. Τότε, η γραμμή MISO δεν χρησιμοποιείται και παραμένει ασύνδετη. Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη μόνο η αποστολή δεδομένων από τους slaves προς τον master, μπορεί η γραμμή MOSI να παραμένει ασύνδετη. Ασύνδετη μπορεί να παραμένει και η γραμμή CS όταν στην όλη επικοινωνία συμμετέχει ένας μοναδικός slave. Στην περίπτωση αυτή, η επικοινωνία θα πρέπει να είναι συνεχώς ενεργή, επομένως όταν, για παράδειγμα, η γραμμή CS είναι active low θα πρέπει να συνδεθεί στη γείωση (κατάσταση LOW). Στο Σχήμα Β.1 απεικονίζεται η διασύνδεση μιας συσκευής master με μια συσκευή slave στα πλαίσια του SPI, καθώς και η κατεύθυνση του κάθε σήματος.



Σχήμα Β.1: Διασύνδεση μιας συσκευής master με μια συσκευή slave στα πλαίσια της διεπαφής SPI, και η κατεύθυνση του κάθε σήματος.

Η έναρξη της επικοινωνίας σηματοδοτείται από τον master με την παραγωγή του σήματος SCLK και την επιλογή κάθε φορά ενός slave, μέσω της εναλλαγής της κατάστασης της γραμμής /CS που αντιστοιχεί σε αυτόν σε LOW. Η συχνότητα του σήματος SCLK δε μπορεί να υπερβαίνει τη μέγιστη υποστηριζόμενη τιμή της αντίστοιχης συσκευής slave, η οποία είναι συνήθως της τάξεως μερικών MHz. Μέσω των δύο γραμμών MOSI και MISO υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης αποστολής και λήψης δεδομένων, γεγονός που καθιστά την επικοινωνία πλήρως αμφίδρομη. Το πλήθος των bytes που περιλαμβάνονται στα δεδομένα που πρόκειται να αποσταλούν είναι γενικά γνωστό εκ των προτέρων. Επομένως, σύμφωνα με τη γνωστή αυτή πληροφορία, ο αριθμός των κύκλων ρολογιού που θα πρέπει να μεσολαβήσουν για την επιτυχή αποστολή ή λήψη όλων των δεδομένων καθορίζεται από τον master πριν από την έναρξη της επικοινωνίας. Τόσο η συσκευή master όσο και κάθε συσκευή slave εμπεριέχουν έναν καταχωρητή ολίσθησης (shift register) το μέγεθος του οποίου είναι τόσα bit όσα εμπεριέχονται στο συνολικό μήνυμα δεδομένων που αποστέλλεται κάθε φορά, συνήθως 8 bit. Το πρώτο bit που εξέρχεται από κάθε καταχωρητή ολίσθησης αποχωρεί από τη θέση του πιο σημαντικού ψηφίου (MSB, Most Significant Bit) και κάθε λαμβανόμενο bit εισέρχεται στη θέση του λιγότερο σημαντικού bit (LSB, Least Significant Bit), όπως φαίνεται και στο Σχήμα Β.2. Με την ολοκλήρωση της επικοινωνίας το σήμα SCLK επανέρχεται σε μία κατάσταση αδράνειας, στην οποία παραμένει μέχρι την έναρξη της επόμενης μεταφοράς δεδομένων.



Σχήμα Β.2: Οργάνωση των bit στους καταχωρητές ολίσθησης των συσκευών master και slave κατά την ανταλλαγή δεδομένων μέσω της διεπαφής SPI.

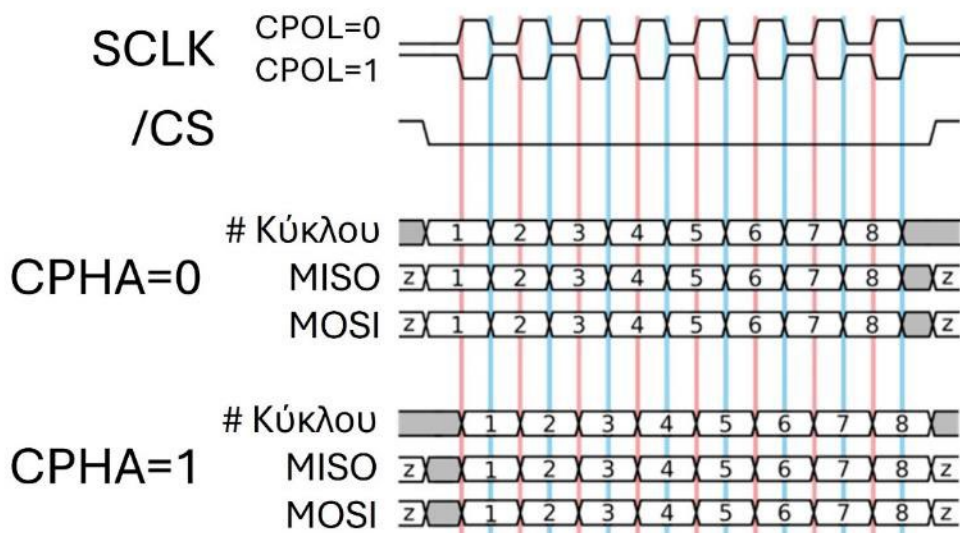
Η συσκευή master ορίζει πλήρως την επικοινωνία μέσω και του προσδιορισμού επιπλέον της πολικότητας και της φάσης του ρολογιού, παράμετροι που καλούνται CPOL (Clock Polarity) και CPHA (Clock Phase) αντίστοιχα. Οι πιθανές τιμές των δύο αυτών παραμέτρων είναι είτε το λογικό 0 είτε το λογικό 1, γεγονός που οδηγεί στον ορισμό τεσσάρων λειτουργιών για το SPI. Η τιμή του CPOL είναι εκείνη η τιμή που έχει το ρολόι κατά την αδρανή κατάσταση, δηλαδή όταν δεν πραγματοποιείται ενεργά κάποια μεταφορά δεδομένων. Επομένως, μια τιμή ίση με “0” για το CPOL υποδηλώνει πως η αδρανής κατάσταση για το σήμα SCLK είναι η κατάσταση LOW (λογικό 0), ενώ μια τιμή ίση με “1” υποδηλώνει πως η αδρανής κατάσταση είναι η HIGH (λογικό 1). Η παράμετρος CPHA καθορίζει σε ποιο μέτωπο του παλμού του

ρολογιού θα πραγματοποιείται η δειγματοληψία των δεδομένων. Έτσι, μια τιμή του CPHA ίση με “0”, υποδηλώνει πως κάθε bit του πακέτου δεδομένων λαμβάνεται σε κάθε καθοδικό μέτωπο του παλμού SCLK (μετάβαση από λογικό 1 σε λογικό 0) και αποστέλλεται σε κάθε ανοδικό μέτωπο του παλμού SCLK (μετάβαση από λογικό 0 σε λογικό 1). Αντίστοιχα, μια τιμή του CPHA ίση με “1” υποδηλώνει πως η δειγματοληψία πραγματοποιείται σε κάθε ανοδικό μέτωπο του παλμού SCLK (μετάβαση από λογικό 0 σε λογικό 1), ενώ το κάθε bit αποστέλλεται σε κάθε καθοδικό μέτωπο του παλμού SCLK (μετάβαση από λογικό 1 σε λογικό 0). Συνολικά, οι τέσσερις λειτουργίες που ορίζονται στα πλαίσια της διεπαφής SPI περιλαμβάνονται στον Πίνακα Β.1.

Πίνακας Β.1: Οι τέσσερις λειτουργίες της διεπαφής SPI.

Αριθμός Λειτουργίας	CPOL	CPHA
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

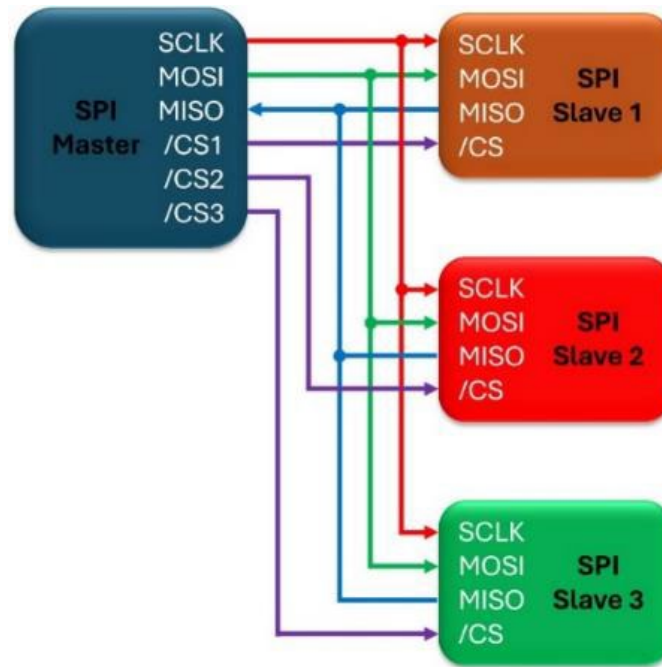
Από τις τέσσερις πιθανές λειτουργίες του SPI, το ποια είναι εκείνη που υποστηρίζεται για την επικοινωνία με κάποια συγκεκριμένη συσκευή αναγράφεται στα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών της συσκευής. Στη συνέχεια, στο Σχήμα Β.3, ακολουθεί μια απεικόνιση των τεσσάρων αυτών λειτουργιών του SPI.



Σχήμα Β.3: Απεικόνιση της μορφής της επικοινωνίας στα πλαίσια της διεπαφής SPI, για τις διάφορες τιμές της πολικότητας ρολογιού (CPOL) και της φάσης του ρολογιού (CPHA).

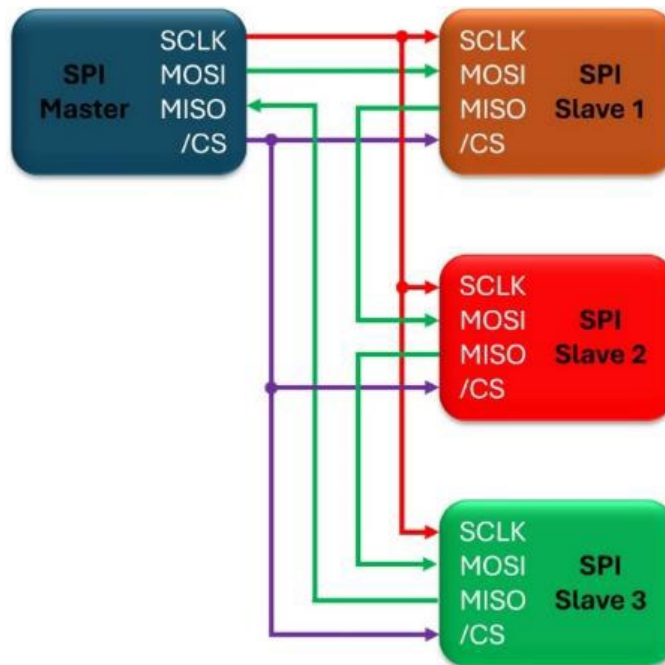
Στην περίπτωση όπου στη συσκευή master συνδέονται πολλές διαφορετικές συσκευές slave, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο πιθανές συνδεσμολογίες, η ανεξάρτητη και η

αλυσιδωτή συνδεσμολογία. Η συνδεσμολογία που συναντάται πιο συχνά είναι η ανεξάρτητη. Κατά την ανεξάρτητη συνδεσμολογία όλες οι συσκευές slave μοιράζονται τις γραμμές SCLK, MOSI και MISO, αλλά χρησιμοποιούν η κάθε μια τη δική της γραμμή /CS. Από τις συσκευές αυτές, εκείνη για την οποία προορίζεται ένα μήνυμα δεδομένων επιλέγεται μέσω του master όταν αυτός οδηγεί τη γραμμή /CS της συσκευής slave σε κατάσταση LOW. Η ανεξάρτητη συνδεσμολογία απεικονίζεται στο Σχήμα Β.4.



Σχήμα Β.4: Η ανεξάρτητη συνδεσμολογία στη διεπαφή SPI.

Στην περίπτωση της αλυσιδωτής συνδεσμολογίας, μόνο η είσοδος MOSI της πρώτης συσκευής slave συνδέεται με την έξοδο MOSI της συσκευής master. Η έξοδος MISO της ίδια συσκευής slave συνδέεται με την είσοδο MOSI της επόμενης συσκευής slave. Η συνδεσμολογία αυτή συνεχίζεται μέχρι την τελευταία συσκευή slave, η έξοδος MISO της οποίας συνδέεται στην είσοδο MISO της συσκευής master. Κατά το πρώτο σύνολο παλμών ρολογιού, πραγματοποιείται μεταφορά των δεδομένων στον πρώτο slave. Στα μετέπειτα σύνολα παλμών τα δεδομένα μεταφέρονται από τον καταχωρητή ολίσθησης του κάθε slave σε αυτόν του επόμενου slave της αλυσίδας, και αντίστοιχα από τον master στον πρώτο slave. Κατ' αυτόν τον τρόπο όλοι οι slaves συμπεριφέρονται ως μία ενιαία συσκευή με έναν κοινό καταχωρητή ολίσθησης. Οι γραμμές SCLK αλλά και SS είναι κοινές για όλες τις συσκευές. Στο Σχήμα Β.5 ακολουθεί μια απεικόνιση της αλυσιδωτής συνδεσμολογίας [182–184].



Σχήμα Β.5: Η αλυσιδωτή συνδεσμολογία στη διεπαφή SPI.

Ο Κώδικας της Εφαρμογής Android

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, μια εφαρμογή Android μπορεί να αποτελείται από διάφορα αρχεία. Το περιεχόμενο των τριών βασικότερων αρχείων κώδικα της εφαρμογής Android που αναπτύχθηκε με σκοπό την καταγραφή δεδομένων RSSI, περιλαμβάνεται στη συνέχεια.

Γ.1 Το αρχείο AndroidManifest.xml

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<manifest xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
  xmlns:tools="http://schemas.android.com/tools"
  tools:ignore="ExtraText">

  <uses-permission android:name="android.permission.READ_EXTERNAL_STORAGE"
  />
  <uses-permission android:name="android.permission.WRITE_EXTERNAL_STORAGE"
  />
  <uses-permission
android:name="android.permission.MANAGE_EXTERNAL_STORAGE"
  tools:ignore="ScopedStorage" />
  <uses-permission android:name="android.permission.READ_PHONE_STATE" />
  <uses-permission android:name="android.permission.ACCESS_FINE_LOCATION"
  />
  <uses-permission android:name="android.permission.ACCESS_NETWORK_STATE"
  />
  <uses-permission
android:name="android.permission.ACCESS_BACKGROUND_LOCATION"/>
  <uses-permission android:name="android.permission.FOREGROUND_SERVICE" />

  <application
    android:requestLegacyExternalStorage="true"
    android:allowBackup="true"
    android:dataExtractionRules="@xml/data_extraction_rules"
    android:fullBackupContent="@xml/backup_rules"
    android:icon="@drawable/ic_launcher"
    android:label="RSSI Logger"
    android:roundIcon="@drawable/ic_launcher"
    android:supportsRtl="true"
    android:theme="@style/Theme.PowerLogger"
    tools:targetApi="31">
    <service android:name=".LoggingService"/>
    <activity
      android:name=".MainActivity"
```



```
        android:exported="true">
        <intent-filter>
            <action android:name="android.intent.action.MAIN" />

            <category android:name="android.intent.category.LAUNCHER" />
        </intent-filter>

        <meta-data
            android:name="android.app.lib_name"
            android:value="" />
    </activity>
</application>

</manifest>
```

Γ.2 Το αρχείο activity_main.xml

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<androidx.constraintlayout.widget.ConstraintLayout
xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
    xmlns:app="http://schemas.android.com/apk/res-auto"
    xmlns:tools="http://schemas.android.com/tools"
    android:id="@+id/container"
    android:layout_width="match_parent"
    android:layout_height="match_parent"
    android:background="@color/main_background_color"
    tools:context=".MainActivity">

    <TextView
        android:id="@+id/Channel"
        android:layout_width="wrap_content"
        android:layout_height="wrap_content"
        android:background="#00FFF7"
        android:paddingLeft="10sp"
        android:paddingRight="5sp"
        android:text="Absolute Radio-Frequency \nChannel Number (ARFCN):\n?"
        android:textAlignment="center"
        android:textColor="#000000"
        android:textSize="12sp"
        android:textStyle="bold"
        app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
        app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

    <TextView
        android:id="@+id/rssiView"
        android:layout_width="wrap_content"
        android:layout_height="wrap_content"
        android:paddingTop="10dp"
        android:text="RSSI"
        android:textColor="@color/rssi_text_view_color"
        android:textSize="24sp"
        android:textStyle="bold"
        app:layout_constraintBottom_toTopOf="@+id/graph"
        app:layout_constraintEnd_toEndOf="parent"
        app:layout_constraintStart_toStartOf="parent" />

    <com.jjoe64.graphview.GraphView
        android:id="@+id/graph"
```



```
    android:layout_width="0px"
    android:layout_height="0px"

    app:layout_constraintBottom_toBottomOf="parent"
    app:layout_constraintDimensionRatio="h,6:5"
    app:layout_constraintEnd_toEndOf="parent"
    app:layout_constraintHorizontal_bias="0.0"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

<ToggleButton
    android:id="@+id/toggleLogging"
    android:layout_width="172dp"
    android:layout_height="48dp"
    android:background="@color/toggle_button_background_color"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="@color/toggle_button_text_color"
    android:textOff="@string/start_logging"
    android:textOn="@string/stop_logging"
    android:textSize="20sp"
    app:layout_constraintBottom_toBottomOf="parent"
    app:layout_constraintEnd_toEndOf="parent"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/graph"
    tools:ignore="HardcodedText" />

<TextView
    android:id="@+id/nowLogging"
    android:layout_width="wrap_content"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:textColor="#FFC107"
    android:textSize="20sp"
    app:layout_constraintBottom_toTopOf="@+id/toggleLogging"
    app:layout_constraintEnd_toEndOf="parent"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/graph" />

<TextView
    android:id="@+id/dataPath"
    android:layout_width="wrap_content"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:textColor="#03A9F4"
    android:textSize="12sp"
    app:layout_constraintBottom_toBottomOf="parent"
    app:layout_constraintEnd_toEndOf="parent"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/toggleLogging" />

<TextView
    android:id="@+id/networkType"
    android:layout_width="wrap_content"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:padding="6dp"
    android:text="Network\nType"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="#FFFFFF"
    android:textSize="14sp"
    android:textStyle="bold"
    app:layout_constraintEnd_toEndOf="parent"
```

```
        app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

<TextView
    android:id="@+id/cellTower"
    android:layout_width="wrap_content"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:background="#FF6600"
    android:paddingLeft="10sp"
    android:paddingRight="5sp"
    android:text="Cell Tower Info\n[MCC, MNC, LAC, Cell ID]\n[?, ?, ?, ?]"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="#000000"
    android:textSize="12sp"
    android:textStyle="bold"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/Channel"
    app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

<TextView
    android:id="@+id/appVersion"
    android:layout_width="wrap_content"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:background="#7A7979"
    android:text="v7"
    app:layout_constraintBottom_toBottomOf="parent"
    app:layout_constraintEnd_toEndOf="parent" />

</androidx.constraintlayout.widget.ConstraintLayout>
```

Γ.3 Το αρχείο MainActivity.kt

```
package com.example.powerlogger

import android.Manifest
import android.annotation.SuppressLint
import android.app.*
import android.content.Context
import android.content.Intent
import android.content.pm.PackageManager
import android.graphics.Color.rgb
import android.location.Location
import android.location.LocationListener
import android.location.LocationManager
import android.net.ConnectivityManager
import android.os.*
import android.provider.Settings
import android.telephony.*
import android.telephony.gsm.GsmCellLocation
import android.view.View
import android.view.ViewTreeObserver
import android.widget.TextView
import android.widget.ToggleButton
import androidx.annotation.RequiresApi
import androidx.appcompat.app.AppCompatActivity
import androidx.appcompat.app.AppCompatActivityDelegate
import androidx.constraintlayout.widget.ConstraintLayout
import androidx.core.app.ActivityCompat
import androidx.core.app.NotificationCompat
import androidx.core.content.ContextCompat
```

```

import com.jjoe64.graphview.GraphView
import com.jjoe64.graphview.GridLabelRenderer
import com.jjoe64.graphview.series.DataPoint
import com.jjoe64.graphview.series.LineGraphSeries
import java.io.File
import java.io.FileWriter
import java.io.IOException
import java.io.PrintWriter
import java.text.SimpleDateFormat
import java.util.*

private const val REQUEST_PERMISSIONS = 1

private val PERMISSIONS = arrayOf(
    Manifest.permission.READ_EXTERNAL_STORAGE,
    Manifest.permission.WRITE_EXTERNAL_STORAGE,
    Manifest.permission.ACCESS_FINE_LOCATION,
    Manifest.permission.ACCESS_BACKGROUND_LOCATION,
    Manifest.permission.READ_PHONE_STATE
)

class MainActivity : AppCompatActivity() {
    val handler = Looper.myLooper()?.let { Handler(it) }
    val delay: Long = 1000 // milliseconds. How often to plot data
    var lastLogTime = System.currentTimeMillis() //milliseconds.
    Initialization of the last log time
    var logPeriod: Long = 10000 // milliseconds. How often to log data
    val graphPoints = 30
    var rssi: Int? = null
    var rssiArray = arrayOfNulls<Int>(graphPoints)
    var index = 0
    var minY = -100
    var maxY = 0
    var i = 0

    private var lastX = 0.0
    private var log = false

    private lateinit var telephonyManager: TelephonyManager
    private lateinit var locationManager: LocationManager
    private lateinit var connectivityManager: ConnectivityManager

    private val locationListener: LocationListener = object :
LocationListener {
        /*
        Even though the methods in here are empty, they are still required to
        be present in the
        object, because they are part of the LocationListener interface and are
        called by the
        system. By including these methods, the object is able to receive the
        events from the
        system, even if it doesn't take any action in response to them.
        */
        override fun onLocationChanged(location: Location) {
            // Handle the location change event
        }

        override fun onStatusChanged(provider: String?, status: Int, extras:
Bundle?) {

```

```
// Handle changes in the location provider's status
}

override fun onProviderEnabled(provider: String) {
    // Handle when a location provider is enabled
}

override fun onProviderDisabled(provider: String) {
    // Handle when a location provider is disabled
}
}

override fun onCreate(savedInstanceState: Bundle?) {
    super.onCreate(savedInstanceState)

    Thread.setDefaultUncaughtExceptionHandler(GlobalExceptionHandler())
    AppCompatActivity.setDefaultNightMode(AppCompatActivity.MODE_NIGHT_NO)

    if (!hasPermissions(this, *PERMISSIONS)) {
        requestPermissions()
    } else {
        setContentView(R.layout.activity_main)
        checkBatteryOptimization()
        val graph = findViewById<View>(R.id.graph) as GraphView
        val displayMetrics = resources.displayMetrics
        val widthPixels = displayMetrics.widthPixels
        val heightPixels = displayMetrics.heightPixels
        val diagonalPixels = Math.sqrt(
            widthPixels * widthPixels +
            heightPixels * heightPixels).toDouble()
        )
        val diagonalInches = diagonalPixels / displayMetrics.densityDpi

        graph.viewTreeObserver.addOnGlobalLayoutListener(object :
            ViewTreeObserver.OnGlobalLayoutListener {
                override fun onGlobalLayout() {
                    graph.viewTreeObserver.removeOnGlobalLayoutListener(this)
                    val params = graph.layoutParams as ConstraintLayout.LayoutParams
                    params.dimensionRatio = if (diagonalInches >= 5.2) "h,1:1" else
                    "h,6:5"
                    graph.layoutParams = params
                }
            })

        // Initialize the Start/Stop Logging button
        val toggleLogging: ToggleButton = findViewById(R.id.toggleLogging)
        toggleLogging.isChecked =
isServiceRunning(LoggingService::class.java)
        if (toggleLogging.isChecked) {
            toggleLogging.setBackgroundColor(rgb(255, 0, 0))
        }

        graph.setPadding(0, 0, 0, 0)
        graph.animate()

        val glr: GridLabelRenderer = graph.gridLabelRenderer
        glr.padding = 70
        glr.numVerticalLabels = 7
        glr.numHorizontalLabels = 7
    }
}
```

```

glr.gridColor = rgb(255, 255, 255)
glr.verticalLabelsColor = rgb(0, 255, 102)
glr.horizontalLabelsColor = rgb(255, 255, 255)

// set manual X bounds
graph.viewport.isXAxisBoundsManual = true
graph.viewport.isYAxisBoundsManual = true

val series: LineGraphSeries<DataPoint> = LineGraphSeries()
series.thickness = 8
series.color = rgb(255, 20, 20)
graph.addSeries(series)

telephonyManager = getSystemService(Context.TELEPHONY_SERVICE) as
TelephonyManager
locationManager = getSystemService(Context.LOCATION_SERVICE) as
LocationManager
connectivityManager =
    getSystemService(Context.CONNECTIVITY_SERVICE) as
ConnectivityManager

var networkType: String?
var arfcn: Int?

handler?.postDelayed(object : Runnable {
    @RequiresApi(Build.VERSION_CODES.N)
    override fun run() {
        networkType = getNetworkType(telephonyManager)
        findViewById<TextView>(R.id.networkType).text = "$networkType"
        if (networkType == "4G") {
            findViewById<TextView>(R.id.networkType).setBackgroundColor(
                rgb(0, 180, 0)
            )
        } else if (networkType == "3G") {
            findViewById<TextView>(R.id.networkType).setBackgroundColor(
                rgb(0, 140, 220)
            )
        } else if (networkType == "2G") {
            findViewById<TextView>(R.id.networkType).setBackgroundColor(
                rgb(240, 150, 0)
            )
        } else {
            findViewById<TextView>(R.id.networkType).setBackgroundColor(
                rgb(255, 0, 0)
            )
        }
    }
}

if (networkType == "4G" || networkType == "2G" || networkType ==
"3G") {
    // Get the frequency channel
    arfcn = getARFCN(
        telephonyManager, locationManager,
        this@MainActivity
    )
    // Get RSSI
    rssi = getRssi(telephonyManager)
    val (mcc, mnc, lac, cid) = getCellTowerInfo(telephonyManager)
    // Display RSSI
    findViewById<TextView>(R.id.rssiView).text = "RSSI: ${

```

```

        if (rssi == null) "?" else "$rssi dBm"
    }"
    // Display the frequency channel
    findViewById<TextView>(R.id.Channel).text =
        "Absolute Radio-Frequency \n" +
        "Channel Number (ARFCN):\n${
            if (arfcn == null) "?"
            else "$arfcn"
        }"
    // Display Cell Tower Info
    findViewById<TextView>(R.id.cellTower).text = "Cell Tower
Info\n" +
        "[MCC, MNC, LAC, Cell ID]\n" +
        "[${if (mcc == null) "?," else "$mcc, "}] +
        "${if (mnc == null) "?," else "$mnc, "}] +
        "${if (lac == null) "?," else "$lac, "}] +
        "${if (cid == null) "?" else "$cid}]"

    if (log) {
        findViewById<TextView>(R.id.dataPath).text =
            "Stored data can be found at: /Internal shared" +
            " storage/RSSI Data"
        when (i) {
            0 -> {
                findViewById<TextView>(R.id.nowLogging).text = "Logging"
                i++
            }
            1 -> {
                findViewById<TextView>(R.id.nowLogging).text = "Logging."
                i++
            }
            2 -> {
                findViewById<TextView>(R.id.nowLogging).text =
"Logging.."
                i++
            }
            3 -> {
                findViewById<TextView>(R.id.nowLogging).text =
"Logging..."
                i = 0
            }
        }
    }

    val currentTime = System.currentTimeMillis()
    val timePassed = currentTime - lastLogTime

    if (timePassed >= logPeriod) {
        logData(rssi, arfcn, networkType, mcc, mnc, lac, cid)
        // Update last execution time
        lastLogTime = currentTime
    }
} else if (!log) {
    // Clear the "Logging..." text fields
    findViewById<TextView>(R.id.dataPath).text = ""
    findViewById<TextView>(R.id.nowLogging).text = ""
}

if (index < graphPoints) {
    rssiArray[index] = rssi
}

```

```

        index += 1
    } else if (index >= graphPoints) index = 0

    minY = rssiArray.filterNotNull().min()
    maxY = rssiArray.filterNotNull().max()
    if (minY == maxY) {
        minY -= 4
        maxY += 4
    }

    series.appendData(
        DataPoint(lastX++, rssi?.toDouble() ?: 0.0),
        false, graphPoints
    )

    graph.viewport.setMinY(minY.toDouble() - 1)
    graph.viewport.setMaxY(maxY.toDouble() + 1)
    if (lastX >= graphPoints) {
        graph.viewport.setMinX(lastX - graphPoints)
        graph.viewport.setMaxX(lastX)
    } else {
        graph.viewport.setMinX(0.0)
        graph.viewport.setMaxX(graphPoints.toDouble())
    }

} else {
    // Don't do anything if the network is neither LTE nor GSM
    findViewById<TextView>(R.id.nowLogging).text = ""
    rssi = null
}
handler.postDelayed(this, delay)
}, delay)

toggleLogging.setOnCheckedChangeListener { _, isChecked ->
    log = if (isChecked) {
        toggleLogging.setBackgroundColor(rgb(255, 0, 0))
        // Start the Logging Service
        val intent = Intent(applicationContext,
LoggingService::class.java)
        if (Build.VERSION.SDK_INT >= Build.VERSION_CODES.O) {
            ContextCompat.startForegroundService(applicationContext,
intent)
        } else {
            startService(intent)
        }
        true
    } else {
        toggleLogging.setBackgroundColor(rgb(0, 255, 0))
        // Stop the Logging Service
        val intent = Intent(applicationContext,
LoggingService::class.java)
        stopService(intent)
        false
    }
}
}
}
}

```

```
fun logData(
    power: Int?, channel: Int?, network: String?,
    mcc: Int?, mnc: Int?, lac: Int?, cid: Int?
) {
    if (Environment.getExternalStorageState() == Environment.MEDIA_MOUNTED)
    {
        val directory = Environment.getExternalStoragePublicDirectory("RSSI
Data")

        if (!directory.exists()) {
            directory.mkdirs()
        }

        val dateFormat = SimpleDateFormat("yyyy-MM-dd", Locale.getDefault())

        // Create a File object for the file
        val fileName = dateFormat.format(Date()) + ".txt"
        val file = File(directory, fileName)

        // Create the File if it doesn't already exist
        if (!file.exists()) {
            file.createNewFile()
        }

        file.writeText("RSSI\tChannel\tNetwork\tMCC\tMNC\tLAC\tCID\tTime\n")
    }
    val timeFormat = SimpleDateFormat("HH:mm:ss", Locale.getDefault())
    val time = timeFormat.format(Date())

    file.appendText("$power\t$channel\t$network\t$mcc\t$mnc\t$lac\t$cid\t$time\n")
}

fun requestPermissions() {
    if (!hasPermissions(this, *PERMISSIONS)) {
        ActivityCompat.requestPermissions(this, PERMISSIONS,
REQUEST_PERMISSIONS)
    }
}

private fun hasPermissions(context: Context, vararg permissions: String):
Boolean {
    if (Build.VERSION.SDK_INT >= Build.VERSION_CODES.Q) {
        // For Android 10 or later, check all permissions
        return permissions.all {
            ActivityCompat.checkSelfPermission(context, it) ==
PackageManager.PERMISSION_GRANTED
        }
    } else {
        // For Android 9 or earlier, exclude ACCESS_BACKGROUND_LOCATION
        val filteredPermissions = permissions.filterNot {
            it == Manifest.permission.ACCESS_BACKGROUND_LOCATION
        }.toArray()
        return filteredPermissions.all {
            ActivityCompat.checkSelfPermission(context, it) ==
PackageManager.PERMISSION_GRANTED
        }
    }
}
```



```

override fun onRequestPermissionsResult(
    requestCode: Int,
    permissions: Array<String>,
    grantResults: IntArray
) {
    super.onRequestPermissionsResult(requestCode, permissions,
grantResults)
    if (requestCode == REQUEST_PERMISSIONS) {
        var allGranted = true
        for (result in grantResults) {
            if (result != PackageManager.PERMISSION_GRANTED) {
                allGranted = false
                break
            }
        }
        if (!allGranted) {
            val message = "All the requested permissions need to be granted in
order for " +
                "the app to function properly. Please grant all the
permissions."
            val builder = AlertDialog.Builder(this)
            builder.setMessage(message)
                .setCancelable(false)
                .setPositiveButton("OK") { _, _ ->
                    requestPermissions()
                }
            val alert = builder.create()
            alert.show()
        } else {
            // Permissions granted, restart the activity
            val intent = Intent(this, MainActivity::class.java)
            startActivity(intent)
            finish()
        }
    }
}

fun getRssi(tm: TelephonyManager): Int? {
    if (Build.VERSION.SDK_INT >= Build.VERSION_CODES.Q) {
        val signalStrengths = tm.signalStrength?.cellSignalStrengths ?:
return null
        val signalStrengthsString: String = signalStrengths.toString()
        val startIndex = signalStrengthsString.indexOf("rssi=") + 5
        if (startIndex <= 4) {
            return null
        }
        val endIndex = signalStrengthsString.indexOf(" ", startIndex)
        if (endIndex == -1) {
            return null
        }
        return try {
            signalStrengthsString.substring(startIndex, endIndex).toInt()
        } catch (e: NumberFormatException) {
            null
        }
    } else if (Build.VERSION.SDK_INT < Build.VERSION_CODES.Q) {
        val cellInfoList = tm.allCellInfo
        for (cellInfo in cellInfoList) {

```

```
        when (cellInfo) {
            is CellInfoLte, is CellInfoWcdma, is CellInfoGsm -> {
                return cellInfo.cellSignalStrength.dbm
            }
        }
    }
}
return null
}

fun getARFCN(tm: TelephonyManager, lm: LocationManager, activity:
Activity): Int? {
    if (!lm.isProviderEnabled(LocationManager.GPS_PROVIDER)) {
        return null
    }

    // If GPS is enabled we can get the RF channel number.
    updateDeviceLocation(lm)

    if (Build.VERSION.SDK_INT >= Build.VERSION_CODES.N) {
        val cellInfo = tm.allCellInfo
        for (info in cellInfo) {
            when (info) {
                is CellInfoGsm -> {
                    return info.cellIdentity.arfcn
                }
                is CellInfoWcdma -> {
                    return info.cellIdentity.uarfcn
                }
                is CellInfoLte -> {
                    return info.cellIdentity.earfcn
                }
            }
        }
    } else {
        val cellLocation = tm.cellLocation as GsmCellLocation
        val cid = cellLocation.cid
        val arfcn = (cid and 0xFF)
        return arfcn
    }
    return null
}

fun updateDeviceLocation(locationManager: LocationManager) {
    locationManager.requestLocationUpdates(
        LocationManager.GPS_PROVIDER,
        0, 0f, locationManager
    )
}

fun getNetworkType(tm: TelephonyManager): String? {
    return when (tm.voiceNetworkType) {
        TelephonyManager.NETWORK_TYPE_GSM,
        TelephonyManager.NETWORK_TYPE_GPRS,
        TelephonyManager.NETWORK_TYPE_EDGE -> "2G"
        TelephonyManager.NETWORK_TYPE_UMTS,
        TelephonyManager.NETWORK_TYPE_CDMA -> "3G"
        TelephonyManager.NETWORK_TYPE_LTE -> "4G"
        TelephonyManager.NETWORK_TYPE_UNKNOWN -> "?"
    }
}
```

```

        else -> "?"
    }
}

fun getCellTowerInfo(tm: TelephonyManager): List<Int?> {
    val mcc: Int?
    val mnc: Int?
    val lac: Int?
    val cid: Int?
    val cellLocation = tm.cellLocation
    if (cellLocation is GsmCellLocation) {
        cid = cellLocation.cid
        lac = cellLocation.lac
        val simOperator = tm.simOperator
        mcc = simOperator.substring(0, 3).toInt()
        mnc = simOperator.substring(3).toInt()
        return listOf(mcc, mnc, lac, cid)
    }
    return listOf(null, null, null, null)
}

// Function to check if the Logging Service is running
private fun isServiceRunning(serviceClass: Class<*>): Boolean {
    val manager = getSystemService(Context.ACTIVITY_SERVICE) as
ActivityManager
    for (service in manager.getRunningServices(Integer.MAX_VALUE)) {
        if (serviceClass.name == service.service.className) {
            return true
        }
    }
    return false
}

private fun checkBatteryOptimization() {
    if (Build.VERSION.SDK_INT >= Build.VERSION_CODES.M) {
        val powerManager = getSystemService(Context.POWER_SERVICE) as
PowerManager
        if (!powerManager.isIgnoringBatteryOptimizations(packageName)) {
            val alertDialogBuilder = AlertDialog.Builder(this)
            alertDialogBuilder.setTitle("Disable Battery Optimization and
Battery Saver ")
            alertDialogBuilder.setMessage("For the logging operation to work
properly, " +
                "battery optimization must be deactivated for this app in the
device " +
                "settings. The related settings can be accessed by clicking on
the 'Battery " +
                "Optimization' text below." +
                "\n\nAdditionally, some devices include a battery saver option
that also " +
                "needs to be deactivated. This option has to be accessed " +
                "manually in the system settings.")
            alertDialogBuilder.setPositiveButton("Battery Optimization") { _, _
->
                val intent =
Intent(Settings.ACTION_IGNORE_BATTERY_OPTIMIZATION_SETTINGS)
                startActivity(intent)
            }
            alertDialogBuilder.setNegativeButton("OK") { dialog, _ ->

```

```
        dialog.dismiss()
    }
    alertDialogBuilder.show()
}
}
}

class LoggingService : Service() {
    private val NOTIFICATION_CHANNEL_ID = "LoggingServiceChannel"
    private val NOTIFICATION_ID = 123

    override fun onBind(intent: Intent?): IBinder? {
        return null
    }

    override fun onStartCommand(intent: Intent?, flags: Int, startId: Int):
Int {
        createNotificationChannel()
        startForeground(NOTIFICATION_ID, createNotification())
        return START_STICKY
    }

    private fun createNotificationChannel() {
        if (Build.VERSION.SDK_INT >= Build.VERSION_CODES.O) {
            val channel = NotificationChannel(
                NOTIFICATION_CHANNEL_ID,
                "Logging Service",
                NotificationManager.IMPORTANCE_DEFAULT
            )
            val manager = getSystemService(NotificationManager::class.java)
            manager.createNotificationChannel(channel)
        }
    }

    private fun createNotification(): Notification {
        val notificationIntent = Intent(this, MainActivity::class.java)
        val pendingIntent = PendingIntent.getActivity(this, 0,
notificationIntent,
            0)
        return NotificationCompat.Builder(this, NOTIFICATION_CHANNEL_ID)
            .setContentTitle("RSSI Logging Service")
            .setContentText("Logging data...")
            .setSmallIcon(R.drawable.ic_launcher)
            .setContentIntent(pendingIntent)
            .build()
    }
}

class GlobalErrorHandler : Thread.UncaughtExceptionHandler {
    private val defaultExceptionHandler: Thread.UncaughtExceptionHandler =
        Thread.getDefaultUncaughtExceptionHandler()

    override fun uncaughtException(thread: Thread, throwable: Throwable) {
        writeToFile(throwable)
        defaultExceptionHandler.uncaughtException(thread, throwable)
    }
}
```

```
private fun writeToFile(throwable: Throwable) {
    val directory = Environment.getExternalStoragePublicDirectory("RSSI
Data")
    if (!directory.exists()) {
        directory.mkdirs()
    }
    val errorLogFile = File(directory, "error_log.txt")

    try {
        val writer = FileWriter(errorLogFile, true)
        val timestamp = SimpleDateFormat(
            "yyyy-MM-dd HH:mm:ss",
            Locale.getDefault()
        ).format(Date())
        writer.append("[${timestamp}]\n")
        throwable.printStackTrace(PrintWriter(writer))

writer.append("\n\n=====
=====\\n\\n")
        writer.close()
    } catch (e: IOException) {
        e.printStackTrace()
    }
}
}
```


Ο Κώδικας του Raspberry Pi του Πομπού και του Δέκτη

Στο σημείο αυτό περιλαμβάνονται οι κώδικες που ήταν απαραίτητοι για τις λειτουργίες του συστήματος του πομπού και του δέκτη που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3. Τα δύο συστήματα περιλαμβάνουν τον κυρίως κώδικα, αλλά και ένα ξεχωριστό αρχείο όπου κατασκευάστηκε μια κλάση για την εκτέλεση βασικών λειτουργιών του DAC που χρησιμοποιήθηκε, DAC8552. Επιπλέον, ο δέκτης περιλαμβάνει ένα ακόμα αρχείο με μια κλάση η οποία ήταν αναγκαία για την εκτέλεση των βασικών λειτουργιών του ADC που χρησιμοποιήθηκε, ADS1256.

Δ.1 Ορισμός κλάσης για τον DAC8552

```
import spidev
import RPi.GPIO as GPIO

# CS Pin definition
CS = 23

# SPI device, bus = 0, device = 0
SPI = spidev.SpiDev(0, 0)

# DAC channels definition
DAC0 = 0x30
DAC1 = 0x34

DAC_MAX_DATA = 65535

DAC_VREF = 3.3

class DAC8532:
    def __init__(self):
        self.cs = CS
        GPIO.setmode(GPIO.BCM)
        GPIO.setwarnings(True)
        GPIO.setup(CS, GPIO.OUT)
        SPI.max_speed_hz = 20000
        SPI.mode = 0b01

    def set_voltage(self, channel, voltage):
```

```
if((voltage <= DAC_VREF) and (voltage >= 0)):
    voltage = int(voltage * DAC_MAX_DATA / DAC_VREF)
    GPIO.output(self.cs, GPIO.LOW)
    SPI.writebytes([channel, voltage >> 8, voltage & 0xff])
    GPIO.output(self.cs, GPIO.HIGH)
else:
    print("Error: Voltage out of the 0 -",DAC_VREF,"V bounds")
```

Δ.2 Ορισμός κλάσης για τον ADS1256

```
import RPi.GPIO as GPIO
import spidev
import time

# Pin definition
CS = 22
RESET = 18
DRDY = 17

# SPI device, bus = 0, device = 1
SPI = spidev.SpiDev(0, 1)

# ADC channels definition
AD0 = 0
AD1 = 1
AD2 = 2
AD3 = 3
AD4 = 4
AD5 = 5
AD6 = 6
AD7 = 7

# gain channel, gain 1
PGA_1 = 0

# data rate, 10 SPS
DRATE_10 = 0x20

# mux register 01H
MUX_REG = 1

# command definition
CMD = {'WAKEUP_CMD' : 0x00, # Completes SYNC and Exits Standby Mode 0000
      0000 (00h)
      'RDATA_CMD' : 0x01, # Read Data 0000 0001 (01h)
      'WREG_CMD' : 0x50, # Write to REG rrr 0101 rrrr (5xh)
      'SYNC_CMD' : 0xFC, # Synchronize the A/D Conversion 1111 1100 (FCh)
      }

class ADS1256:
    def __init__(self):
        self.cs = CS
        self.rst = RESET
        self.drdy = DRDY
        try:
            GPIO.setmode(GPIO.BCM)
```



```

GPIO.setwarnings(True)
GPIO.setup(RESET, GPIO.OUT)
GPIO.setup(CS, GPIO.OUT)
GPIO.setup(DRDY, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
SPI.max_speed_hz = 20000
SPI.mode = 0b01
except:
    return -1
self.reset()
self.config_adc(PGA_1, DRATE_10)
return 0

# Hardware reset
def reset(self):
    GPIO.output(self.rst, GPIO.HIGH)
    time.sleep(0.2)
    GPIO.output(self.rst, GPIO.LOW)
    time.sleep(0.2)
    GPIO.output(self.rst, GPIO.HIGH)

def write_cmd(self, reg):
    GPIO.output(self.cs, GPIO.LOW)#cs 0
    SPI.writebytes([reg])
    GPIO.output(self.cs, GPIO.HIGH)#cs 1

def write_to_register(self, reg, data):
    GPIO.output(self.cs, GPIO.LOW)#cs 0
    SPI.writebytes([CMD['WREG_CMD'] | reg, 0x00, data])
    GPIO.output(self.cs, GPIO.HIGH)#cs 1

def wait_drdy(self):
    for i in range(0,400000,1):
        if(GPIO.input(self.drdy) == 0):
            break
    if(i >= 400000):
        print ("Time Out ...\r\n")

#The configuration parameters of ADC, gain and data rate
def config_adc(self, gain, drate):
    self.wait_drdy()
    buffer = [0,0,0,0,0,0,0,0]
    buffer[0] = (0<<3) | (1<<2) | (0<<1)
    buffer[1] = 0x08
    buffer[2] = (0<<5) | (0<<3) | (gain<<0)
    buffer[3] = drate

    GPIO.output(self.cs, GPIO.LOW)#cs 0
    SPI.writebytes([CMD['WREG_CMD'] | 0, 0x03])
    SPI.writebytes(buffer)

    GPIO.output(self.cs, GPIO.HIGH)#cs 1
    time.sleep(0.001)

def read_adc_data(self):
    self.wait_drdy()
    GPIO.output(self.cs, GPIO.LOW)#cs 0
    SPI.writebytes([CMD['RDATA_CMD']])
    # time.sleep(0.01)

```

```
buffer = SPI.readbytes(3)
GPIO.output(self.cs, GPIO.HIGH)#cs 1
read = (buffer[0]<<16) & 0xff0000
read |= (buffer[1]<<8) & 0xff00
read |= (buffer[2]) & 0xff
if (read & 0x800000):
    read &= 0xF00000
return read

def read_channel(self, channel):
    # Single-ended input
    self.write_to_register(MUX_REG, (channel<<4) | (1<<3))
    self.write_cmd(CMD['SYNC_CMD'])
    # time.sleep(0.01)
    self.write_cmd(CMD['WAKEUP_CMD'])
    # time.sleep(0.2)
    data = self.read_adc_data()
    return data
```

Δ.3 Ο κυρίως κώδικας του πομπού

```
from DAC8532 import DAC8532, DAC0, DAC1
import RPi.GPIO as GPIO
import socket
import time

# Define the port number for the communication with the receiver
PORT = 12345

# Define the physical pin names and assign the corresponding GPIO number to
them
# Pins to control the base of the transistor switches
P27 = 16 # GPIO 16, Physical Pin 27
P28 = 20 # GPIO 20, Physical Pin 28
P29 = 21 # GPIO 21, Physical Pin 29

# Pins to control the RF switches
# RF switch 1 (selecting between f2 & f4)
P21 = 5 # GPIO 5, Physical Pin 21
P22 = 6 # GPIO 6, Physical Pin 22

# RF switch 2 (selecting between the output of RF switch 1 & f6)
P24 = 19 # GPIO 19, Physical Pin 24
P25 = 26 # GPIO 26, Physical Pin 25

# Define the tuning voltage required for each frequency on the related VCO
V_TUNE = {
    'freq_2': 3.440,
    'freq_4': 1.837,
    'freq_6': 2.879
}

def wait_for_connection(sock):
    print("Waiting for instructions from the receiver.")
    while True:
        try:
            connection, client_address = sock.accept()
```

```

    print(f"Receiver connected from {client_address}")
    return connection
except socket.error as e:
    time.sleep(2) # Wait for 2 seconds before trying again

def set_antenna_voltage(freq, DAC):
    DAC.set_voltage(DAC1, V_DIODE[freq])

def set_frequency(freq, DAC):
    # Use the GPIO to turn the VCOs ON/OFF via the transistor switches
    # Turn all the VCOs OFF
    GPIO.output(P27, GPIO.LOW)
    GPIO.output(P28, GPIO.LOW)
    GPIO.output(P29, GPIO.LOW)

    # Turn the required VCO ON, and select the correct path towards it using
    the RF switches
    if freq == "freq_2":
        # Set the right state for each RF switch to select the output of the
        correct VCO
        # RF switch 1
        GPIO.output(P21, GPIO.LOW)
        GPIO.output(P22, GPIO.HIGH)
        # RF switch 2
        GPIO.output(P24, GPIO.LOW)
        GPIO.output(P25, GPIO.HIGH)
        # Enable the transistor to turn on the VCO
        GPIO.output(P27, GPIO.HIGH)
    elif freq == "freq_4":
        # Set the right state for each RF switch to select the output of the
        correct VCO
        # RF switch 1
        GPIO.output(P21, GPIO.HIGH)
        GPIO.output(P22, GPIO.LOW)
        # RF switch 2
        GPIO.output(P24, GPIO.LOW)
        GPIO.output(P25, GPIO.HIGH)
        # Enable the transistor to turn on the VCO
        GPIO.output(P28, GPIO.HIGH)
    elif freq == "freq_6":
        # Set the right state for each RF switch to select the output of the
        correct VCO
        # The state of RF switch1 doesn't matter here. Its output won't be
        selected by RF switch 2.
        # RF switch 1
        GPIO.output(P21, GPIO.LOW)
        GPIO.output(P22, GPIO.LOW)
        # RF switch 2
        GPIO.output(P24, GPIO.HIGH)
        GPIO.output(P25, GPIO.LOW)
        # Enable the transistor to turn on the VCO
        GPIO.output(P29, GPIO.HIGH)
    DAC.set_voltage(DAC0, V_TUNE[freq])

def main():
    # Initialize DAC
    DAC = DAC8532()

    # Specify number system

```

```
GPIO.setmode(GPIO.BCM)

# Set the 3 GPIOs needed to control the transistor switches as output
GPIO.setup(P27, GPIO.OUT)
GPIO.setup(P28, GPIO.OUT)
GPIO.setup(P29, GPIO.OUT)

# Same for the 4 GPIOs needed to control the RF switches
# RF switch 1
GPIO.setup(P21, GPIO.OUT)
GPIO.setup(P22, GPIO.OUT)

# RF Switch 2
GPIO.setup(P24, GPIO.OUT)
GPIO.setup(P25, GPIO.OUT)

# Initialize socket
sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
sock.bind(('0.0.0.0', PORT))
sock.listen(1)

connection = wait_for_connection(sock)

while True:
    try:
        # Wait for instructions from the Receiver
        instruction = connection.recv(1024).decode()

        if not instruction:
            print("Receiver disconnected. Waiting for it to reconnect.")
            connection.close()
            connection = wait_for_connection(sock)
            continue

        # Process the instruction
        if instruction.startswith("Transmit on Frequency"):
            freq = instruction.split()[-1]
            set_frequency(freq, DAC)
            print(f"Now transmitting on {freq}")
            connection.sendall(f"Transmitting on Frequency {freq}".encode())
        else:
            print("Invalid instruction received")

    except (socket.error, ConnectionResetError):
        print("Receiver disconnected. Waiting for it to reconnect.")
        connection.close()
        connection = wait_for_connection()

if __name__ == '__main__':
    main()
```

Δ.4 Ο κυρίως κώδικας του δέκτη

```
from ADS1256 import ADS1256, AD0, AD1
from DAC8532 import DAC8532, DAC0
from datetime import datetime
from locale import ABDAY_1
import os
```

```

import pyodbc
import RPi.GPIO as GPIO
import socket
import time

# Pins to control the RF switch
# RF Switch Pin A
P21 = 5 # GPIO 5, Physical Pin 21
# RF Switch Pin B
P22 = 6 # GPIO 6, Physical Pin 22

# How many seconds to wait between logs
LOG_DELAY = 3

# Define the address and port of the Transmitter
TRANSMITTER_IP = "195.130.115.127"
PORT = 12345
TRANSMITTER_ADDRESS = (TRANSMITTER_IP, PORT)

# Define a variable to store the connection string for the database
CONNECTION_STRING = (
    'DRIVER={FreeTDS};'
    'Server=195.130.115.124;'
    'PORT=1434;'
    'DATABASE=RaspberryDB;'
    'UID=rpi;'
    'PWD=<To password εισάγεται εδώ>;'
    'TDS_Version=7.2;'
)

def connect_to_transmitter(socket):
    print("Waiting for transmitter to become available...")
    while True:
        try:
            # Connect to the transmitter
            socket.connect(TRANSMITTER_ADDRESS)
            connected = True
            break # If connected, break out of the loop
        except ConnectionRefusedError:
            time.sleep(2) # Wait for 2 seconds before retrying

def log_to_database(cursor, data, volt, power, freq):
    table_name = freq
    try:
        # Store the data to the database
        cursor.execute(f"INSERT INTO {table_name} (ADCdata, Voltage,
SignalPower) VALUES (?, ?, ?)", data, volt, power)
        # Save changes
        cursor.commit()
    except:
        print("Something went wrong when trying to store the data to the
database.")

def log_to_file(data, volt, power, folder_name):
    dt = datetime.now()

    # Create a folder if it doesn't already exist
    if not os.path.exists(folder_name):
        os.makedirs(folder_name)

```

```
# Get the current date and time to be used as the name of the log file
month = dt.month
day = dt.day
year = dt.year
filename = os.path.join(folder_name, f"{month}-{day}-{year}.txt")
time = dt.strftime("%X")

with open(filename, "a") as file:
    file.write(f"{time}\t{data}\t{volt}\t{power}\n")

def set_antenna_voltage(freq, DAC):
    if freq == "freq_2":
        vout = 0
    elif freq == "freq_4":
        vout = 0.42
    elif freq == "freq_6":
        vout = 0.85
    DAC.set_voltage(DAC0, vout)

def read_power(freq, ADC):
    if freq == "freq_2":
        # Read the data on the channel AD0 of the ADC
        raw_data = ADC.read_channel(AD0)
        a = -40.9836
        b = 19.6
    elif freq == "freq_4" or "freq_6":
        # Read the data on the channel AD1 of the ADC
        raw_data = ADC.read_channel(AD1)
        a = -40
        b = 25

    # Calculate the voltage
    voltage = raw_data*5/(2**23-1)
    voltage = round(voltage, 7)

    # Calculate the power
    power = a * voltage + b
    power = round(power, 5)

    return raw_data, voltage, power

def main():
    # Initialize ADC and DAC
    ADC = ADS1256()
    DAC = DAC8532()

    # Specify number system
    GPIO.setmode(GPIO.BCM)

    # Set the 2 GPIOs needed to control the RF Switch as output
    GPIO.setup(P21, GPIO.OUT)
    GPIO.setup(P22, GPIO.OUT)

    # Initialize socket
    sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    sock.setsockopt(socket.SOL_SOCKET, socket.SO_REUSEADDR, 1) # Set socket
    option
    sock.bind(('0.0.0.0', PORT))
```

```

connect_to_transmitter(sock)

# Initialize database connector
connector = pyodbc.connect(CONNECTION_STRING)

cursor = connector.cursor()

while True:

print("=====
=====")
    frequencies = ["freq_2", "freq_4", "freq_6"]

    for freq in frequencies:
        instruction_sent = False

        if freq == "freq_2":
            GPIO.output(P21, GPIO.HIGH)
            GPIO.output(P22, GPIO.LOW)
        elif freq == "freq_4" or freq == "freq_6":
            GPIO.output(P21, GPIO.LOW)
            GPIO.output(P22, GPIO.HIGH)

        while not instruction_sent:
            try:
                # Send instruction to the transmitter with secret key
                instruction = f"Transmit on Frequency {freq}"

                sock.sendall(instruction.encode())

                # Wait for response from the transmitter
                response = sock.recv(1024).decode()
                if response == f"Transmitting on Frequency {freq}":
                    set_antenna_voltage(freq, DAC)

                    time.sleep(LOG_DELAY)

                    raw_data, voltage, power = read_power(freq, ADC)

                    log_to_database(cursor, raw_data, voltage, power, freq)
                    log_to_file(raw_data, voltage, power, freq)

                    print(freq, " | ADC Data: ", raw_data, "\t Voltage: ", voltage,
"\t Power: ", power)

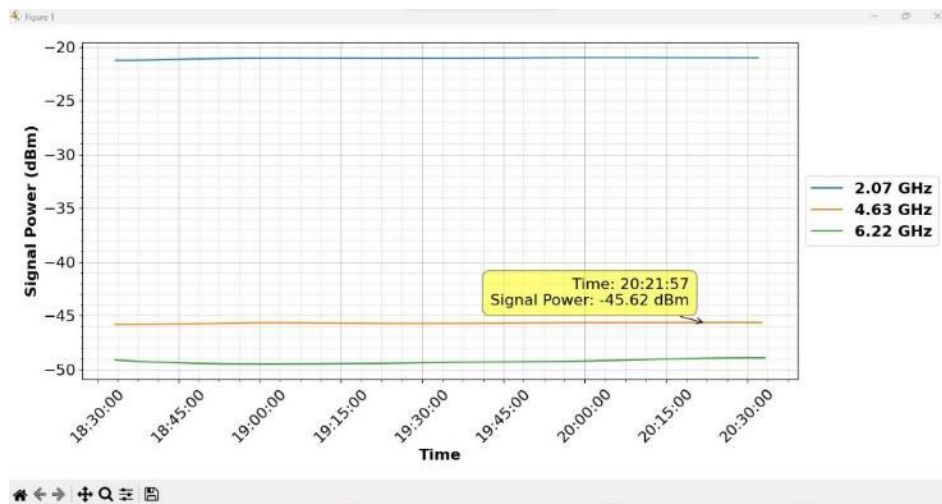
                    instruction_sent = True
            else:
                print(f"Error: Did not receive confirmation from transmitter")
            except (BrokenPipeError, ConnectionResetError):
                print("Connection lost. Reconnecting...")
                sock.close() # Close the previous socket
                sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM) # Create
a new socket
                connect_to_transmitter(sock)
                time.sleep(2) # Wait for 2 seconds before retrying

if __name__ == '__main__':
    main()

```


Προβολή σε Πραγματικό Χρόνο των Μετρήσεων Ισχύος που Αποθηκεύονται στη Βάση Δεδομένων

Για τη δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο των μετρήσεων της ισχύος σήματος που αποστέλλονται από το σύστημα του δέκτη και αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Python. Το πρόγραμμα μπορεί να εκτελεστεί σε οποιοδήποτε υπολογιστή έχει εγκατεστημένη την Python και κατασκευάζει ένα γράφημα όπου εμφανίζονται οι μετρήσεις ισχύος των τελευταίων 120 λεπτών για τις τρεις συχνότητες των 2.07, 4.63 και 6.22 GHz. Το πρόγραμμα λαμβάνει τις μετρήσεις μέσω της σύνδεσης στη βάση δεδομένων. Το γράφημα που εμφανίζει φαίνεται στο Σχήμα Ε.1.



Σχήμα Ε.1: Το γράφημα που εμφανίζει το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε με σκοπό την προβολή των δεδομένων ισχύος σε πραγματικό χρόνο

Στη συνέχεια ακολουθεί ο κώδικας Python του προγράμματος αυτού:

```
from matplotlib.animation import FuncAnimation
import matplotlib.dates as mdates
import matplotlib.pyplot as plt
import mplcursors
import pandas as pd
```

Παράρτημα Ε: Προβολή σε Πραγματικό Χρόνο των Μετρήσεων Ισχύος που Αποθηκεύονται στη Βάση Δεδομένων

```
import pyodbc

# Database connection details
server = '195.130.115.124,1434'
database = 'RaspberryDB'
username = '<To username εισάγεται εδώ>'
password = '<To password εισάγεται εδώ>'

# Connect to the database
conn_str = f"DRIVER={{ODBC Driver 17 for SQL
Server}};SERVER={server};DATABASE={database};UID={username};PWD={password}"
conn = pyodbc.connect(conn_str)

# Query function
def fetch_data():
    query = """
    DECLARE @DurationMinutes INT = 120;

    SELECT 'freq_2' AS Frequency, SignalPower, LogDateTime
    FROM freq_2
    WHERE LogDateTime >= DATEADD(MINUTE, -@DurationMinutes, GETDATE())

    UNION ALL

    SELECT 'freq_4' AS Frequency, SignalPower, LogDateTime
    FROM freq_4
    WHERE LogDateTime >= DATEADD(MINUTE, -@DurationMinutes, GETDATE())

    UNION ALL

    SELECT 'freq_6' AS Frequency, SignalPower, LogDateTime
    FROM freq_6
    WHERE LogDateTime >= DATEADD(MINUTE, -@DurationMinutes, GETDATE());
    """
    return pd.read_sql(query, conn)

# Dictionary to map frequency values to corresponding labels
freq_labels = {'freq_2': '2.07 GHz', 'freq_4': '4.63 GHz', 'freq_6': '6.22
GHz'}

# Plot Function
def plot_data(i):
    df = fetch_data()
    df['LogDateTime'] = pd.to_datetime(df['LogDateTime'])

    plt.clf()
    for freq in df['Frequency'].unique():
        df_freq = df[df['Frequency'] == freq]
        plt.plot(df_freq['LogDateTime'], df_freq['SignalPower'],
label=freq_labels.get(freq, freq)) # Replace legend label

    plt.xlabel('Time', weight='bold') # Change xlabel to 'Time' and make it
bold
    plt.ylabel('Signal Power (dBm)', weight='bold') # Make ylabel bold
    plt.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1, 0.5), prop={'weight':
'bold'}) # Move legend outside and make it bold
    plt.xticks(rotation=45)
```

Παράρτημα Ε: Προβολή σε Πραγματικό Χρόνο των Μετρήσεων Ισχύος που Αποθηκεύονται στη Βάση Δεδομένων

```
plt.tight_layout()
plt.grid(True, which='both', linestyle=':', linewidth='0.5') # Add both
major and minor grid lines
plt.grid(True, linestyle='-', linewidth='0.5') # Change major grid lines
to solid line

# Add minor ticks on both x and y axes
plt.minorticks_on()

# Set date format for x-axis ticks to display only the time
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M:%S'))

# Add data labels on hover
cursor = mplcursors.cursor(hover=True)
cursor.connect("add", lambda sel: sel.annotation.set_text(f"Signal Power:
{sel.target[1]:.2f} dBm"))

# Live plot setup
fig = plt.figure()
ani = FuncAnimation(fig, plot_data, interval=3000) # Update every 3 seconds

plt.show()

# Close the database connection
conn.close()
```

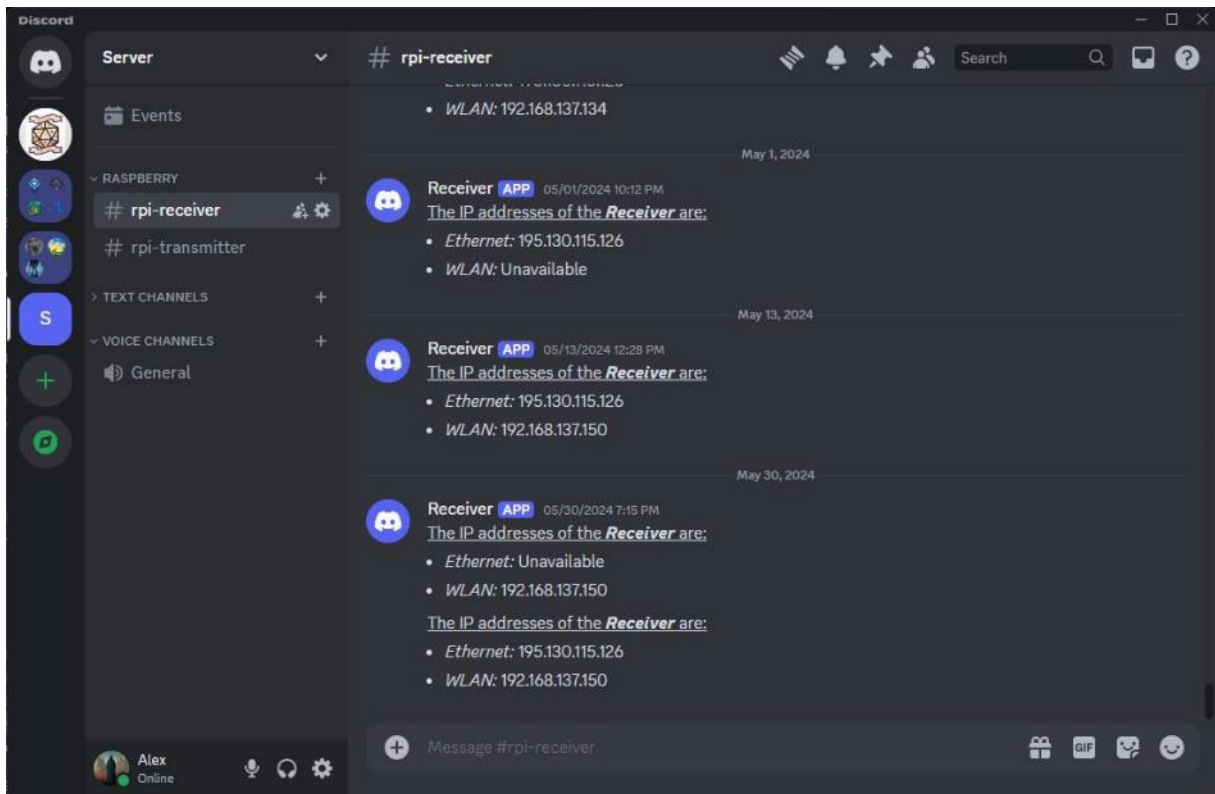

Αποστολή Μηνυμάτων από το Raspberry Pi προς έναν Server της Κοινωνικής Πλατφόρμας Discord

Μια επιπλέον λειτουργικότητα που προστέθηκε τόσο στο σύστημα του πομπού όσο και σε εκείνο του δέκτη ήταν η αποστολή μηνυμάτων σε έναν server της κοινωνικής πλατφόρμας Discord. Τα μηνύματα αυτά περιλάμβαναν τη διεύθυνση IP του κάθε συστήματος στο διαδίκτυο (Ethernet και Wi-Fi), και αποστέλλονταν αμέσως κάθε φορά που πραγματοποιούνταν κάποια αλλαγή σε αυτή. Με τον τρόπο αυτόν υπήρχε έγκαιρη ειδοποίηση στην περίπτωση που χάνονταν η σύνδεση κάποιου Raspberry Pi στο διαδίκτυο ή όταν το Raspberry Pi επανέρχονταν σε λειτουργία έπειτα από κάποια διακοπή ρεύματος.

Το Discord είναι μια ευέλικτη κοινωνική πλατφόρμα η οποία έχει σχεδιαστεί κυρίως για την κοινότητα των gamers, αλλά τα τελευταία χρόνια έχει επεκταθεί για να εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα ομάδων και ενδιαφερόντων. Συνδυάζει λειτουργίες συνομιλίας κειμένου, φωνής και βίντεο, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν και να συμμετέχουν σε κοινότητες γνωστές ως "servers". Κάθε server μπορεί να έχει πολλαπλά κανάλια για διαφορετικά θέματα ή δραστηριότητες, διευκολύνοντας τις οργανωμένες και δυναμικές συναναστροφές μεταξύ των μελών του. Με τη φιλική προς τον χρήστη διεπαφή του, την πληθώρα λειτουργιών του, συμπεριλαμβανομένου του διαμοιρασμού οθόνης και της ενοποίησης με άλλες εφαρμογές, και την ισχυρή έμφαση στην κοινότητα και την αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, το Discord έχει γίνει ένα δημοφιλές εργαλείο για την κοινωνικοποίηση, τη συνεργασία και τη δημιουργία διαδικτυακών κοινοτήτων.

Για την αποστολή μηνυμάτων από το Raspberry Pi σε κάποιον server του Discord θα πρέπει κάποιος να είναι διαχειριστής αυτού του server και να κατασκευάσει ένα webhook για το κανάλι του server στο οποίο επιθυμεί να λαμβάνονται τα μηνύματα. Η κατασκευή του webhook μπορεί να γίνει με τη μετάβαση στις ρυθμίσεις του καναλιού. Αναλυτικές οδηγίες μπορούν να βρεθούν πολύ εύκολα με μια αναζήτηση στο διαδίκτυο. Αφού κατασκευαστεί το webhook μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή μηνυμάτων στο Discord, χωρίς να είναι απαραίτητη η εγκατάσταση του στην πλευρά από όπου προέρχονται τα μηνύματα. Τα μηνύματα που έστειλε το σύστημα του δέκτη φαίνονται στο Σχήμα ΣΤ.1 που ακολουθεί. Πανομοιότυπη μορφή είχαν και εκείνα που έστειλε το σύστημα του πομπού, τα οποία λαμβάνονταν και εμφανίζονταν σε ένα διαφορετικό κανάλι κειμένου.

Παράρτημα ΣΤ: Αποστολή Μηνυμάτων από το Raspberry Pi προς έναν Server της Κοινωνικής Πλατφόρμας Discord



Σχήμα ΣΤ.1: Απεικόνιση των μηνυμάτων που αποστέλλονταν από το σύστημα του δέκτη προς τον server της κοινωνικής πλατφόρμας Discord κάθε φορά που πραγματοποιούνταν οποιαδήποτε αλλαγή στη διεύθυνση IP του.

ΣΤ.1 Ο κώδικας για την αποστολή των μηνυμάτων

Για την αποστολή των μηνυμάτων, στην πλευρά κάθε Raspberry Pi, κατασκευάστηκε ένα αρχείο Python με όνομα "send_ip_to_discord.py". Το αρχείο αυτό τοποθετήθηκε μέσα σε έναν φάκελο ονομαζόμενο "ip2discord", ο οποίος βρισκόταν στην επιφάνεια εργασίας (Desktop) του Raspberry Pi. Ο κώδικας του αρχείου ήταν ο εξής:

```
import requests
import netifaces

# Get the Discord webhook URL
webhook_url = '<Το URL του webhook εισάγεται εδώ>'

# Get the IP addresses for the network interfaces
eth_ifaddr = netifaces.ifaddresses('eth0')
eth_ip = eth_ifaddr[netifaces.AF_INET][0]['addr'] if netifaces.AF_INET in
eth_ifaddr else 'Unavailable'

wlan_ifaddr = netifaces.ifaddresses('wlan0')
wlan_ip = wlan_ifaddr[netifaces.AF_INET][0]['addr'] if netifaces.AF_INET in
wlan_ifaddr else 'Unavailable'
```

```

# Load the last known IP addresses from the txt file
try:
    with open('/home/pi/Desktop/ip2discord/last-ip.txt', 'r') as f:
        last_eth_ip, last_wlan_ip = f.read().strip().split(',')
except:
    last_eth_ip, last_wlan_ip = None, None

# Exit the script if the IP addresses have not changed
if eth_ip == last_eth_ip and wlan_ip == last_wlan_ip:
    exit()

# Save the current IP addresses to the file
with open('/home/pi/Desktop/ip2discord/last-ip.txt', 'w') as f:
    f.write(f'{eth_ip},{wlan_ip}')

# Create the content of the message to be sent
message_content = "__The IP addresses of the ***Transmitter*** are:__\n"
message_content += f"- *Ethernet:* {eth_ip}\n"
message_content += f"- *WLAN:* {wlan_ip}\n"

# Create the JSON data for the webhook
data = {
    'content': message_content
}

# Send the webhook
response = requests.post(webhook_url, json=data)

# Check if the webhook was sent successfully
if response.status_code == 204:
    print('Webhook sent successfully!')
else:
    print(f'Error sending webhook: {response.text}')

```

Στον κώδικα αυτόν, αρχικά, εισάγονται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες. Η βιβλιοθήκη `requests` χρησιμοποιείται για την αποστολή αιτημάτων HTTP (Hypertext Transfer Protocol, Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερκειμένου) στο webhook του Discord, ενώ η `netifaces` παρέχει πρόσβαση στις IP διευθύνσεις των δικτυακών διεπαφών `eth0` και `wlan0`.

Στη συνέχεια, ορίζεται η μεταβλητή `“webhook_url”` με το URL (Uniform Resource Locator, Ενιαίος Εντοπιστής Πόρων) του Discord webhook, στο οποίο θα σταλούν τα μηνύματα. Οι IP διευθύνσεις για όλες τις δικτυακές διεπαφές αποκτώνται με τη χρήση της εντολής `“netifaces.ifaddresses(‘eth0’)”` για την `eth0` (Ethernet), καθώς και της εντολής `“netifaces.ifaddresses(‘wlan0’)”` για την `wlan0` (Wi-Fi).

Ακολουθεί η φόρτωση των τελευταίων γνωστών IP διευθύνσεων από το αρχείο `“last-ip.txt”`, το οποίο βρίσκεται στον ίδιο φάκελο με το αρχείο του κώδικα (`“ip2discord”`), και κατασκευάζεται από το παρόν σενάριο (`script`) αν είναι απαραίτητο. Χρησιμοποιείται ένα τμήμα `“try-except”` για να φορτώσει τις τελευταίες IP διευθύνσεις και να τις αποθηκεύσει στις μεταβλητές `“last_eth_ip”` και `“last_wlan_ip”`. Αν το αρχείο δεν υπάρχει ή δεν μπορεί να διαβαστεί, οι μεταβλητές τίθενται σε τιμή `None`.

Εάν οι τρέχουσες IP διευθύνσεις (“eth_ip” και “wlan_ip”) είναι ίδιες με τις τελευταίες που αποθηκεύτηκαν στο αρχείο κειμένου, το σενάριο τερματίζεται χωρίς να στείλει νέο μήνυμα στο κανάλι του server του Discord. Διαφορετικά, αν είναι διαφορετικές, οι τρέχουσες IP διευθύνσεις αποθηκεύονται στο αρχείο “last-ip.txt”. Το αρχείο συγκρατεί μόνο τις τελευταίες τιμές των δύο μεταβλητών.

Ακολουθεί η κατασκευή του περιεχομένου του μηνύματος που θα σταλεί τελικά στο Discord, περιλαμβάνοντας τις IP διευθύνσεις των δικτυακών διεπαφών eth0 και wlan0. Δημιουργείται ένα αντικείμενο JSON (JavaScript Object Notation, Γράφημα Αντικειμένου JavaScript) με τα δεδομένα που θα σταλούν μέσω του webhook στο Discord. Το κύριο πεδίο είναι το content, το οποίο περιέχει το μήνυμα που θα εμφανιστεί στο κανάλι κειμένου του Discord. Η αποστολή του μηνύματος γίνεται με τη χρήση της εντολής “requests.post”.

Τέλος, ελέγχεται ο κωδικός κατάστασης της απάντησης (response) για να διαπιστωθεί αν το webhook στάλθηκε επιτυχώς. Αν η αποστολή ήταν επιτυχής, τυπώνεται το μήνυμα 'Webhook sent successfully!'. Διαφορετικά, τυπώνεται ένα μήνυμα σφάλματος που περιέχει την απάντηση του server.

ΣΤ.2 Αυτοματοποίηση του σεναρίου αποστολής μηνυμάτων

Όπως είναι φυσικό, το σενάριο αποστολής μηνυμάτων στο κανάλι κειμένου του server του Discord έπρεπε να ελέγχει ανά τακτά χρονικά διαστήματα για μεταβολές στις διευθύνσεις IP του Raspberry Pi. Για τον λόγο αυτόν η διαδικασία έπρεπε να γίνεται αυτόματα. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της κατασκευής ενός αρχείου υπηρεσίας, του “my-discord-webhook.service”. Στο συγκεκριμένο αρχείο ορίστηκε το σενάριο αποστολής μηνυμάτων ως υπηρεσία η οποία ξεκινάει αυτόματα με την εκκίνηση του Raspberry Pi, και μετέπειτα εκτελείται κάθε 5 δευτερόλεπτα. Για την κατασκευή του αρχείου εκτελέστηκε στο τερματικό η εντολή:

```
$ sudo nano /etc/systemd/system/my-discord-webhook.service
```

Αφού δημιουργήθηκε το αρχείο στο σωστό σημείο του συστήματος αρχείων του Raspberry Pi OS, έγινε εισαγωγή όσων αναγράφονται αμέσως μετά και έπειτα έγινε αποθήκευση. Το περιεχόμενο του αρχείου ήταν:

```
[Unit]
Description=My Discord Webhook
After=network-online.target
```

```
[Service]
Type=simple
Restart=always
RestartSec=5
```



```
User=pi
WorkingDirectory=/home/pi/Desktop/ip2discord
ExecStart=/bin/bash -c 'echo "" > /home/pi/Desktop/ip2discord/last-ip.txt
&& while ;; do /usr/bin/python3
/home/pi/Desktop/ip2discord/send_ip_to_discord.py && sleep 5; done'

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

Τα περιεχόμενα του αρχείου υπηρεσίας είναι τα εξής:

- Η ενότητα “[Unit]” περιέχει μια περιγραφή της υπηρεσίας και καθορίζει τις εξαρτήσεις (dependencies). Το πεδίο “Description” παρέχει μια σύντομη περιγραφή, υποδεικνύοντας ότι η υπηρεσία ονομάζεται “My Discord Webhook”. Το πεδίο “After” διασφαλίζει ότι αυτή η υπηρεσία ξεκινά μόνο αφού το δίκτυο είναι πλήρως λειτουργικό, εξαρτώμενη από το “network-online.target”.
- Στην ενότητα “[Service]”, καθορίζονται διάφορες σημαντικές ρυθμίσεις. Η ρύθμιση “Type=simple” υποδεικνύει ότι η υπηρεσία ξεκινά μια διαδικασία που παραμένει στο προσκήνιο και δεν δημιουργεί νέα διαδικασία (fork). Η εντολή “Restart=always” διασφαλίζει ότι η υπηρεσία επανεκκινείται αυτόματα αν σταματήσει για οποιονδήποτε λόγο, ενώ η “RestartSec=5” καθορίζει καθυστέρηση 5 δευτερολέπτων πριν την επανεκκίνηση. Η εντολή “User=pi” εκτελεί την υπηρεσία ως ο βασικός χρήστης “pi” του Raspberry Pi, διασφαλίζοντας ότι έχει τα κατάλληλα δικαιώματα και περιβάλλον. Η “WorkingDirectory=/home/pi/Desktop/ip2discord” καθορίζει τον φάκελο εργασίας για την υπηρεσία, δείχνοντας στη θέση του αρχείου “send_ip_to_discord.py” που αποστέλλει τα μηνύματα στο Discord όπως περιγράφηκε προηγουμένως.
- Το πεδίο “ExecStart” καθορίζει την εντολή που εκτελείται για να ξεκινήσει η υπηρεσία. Αυτή η εντολή πρώτα καθαρίζει το περιεχόμενο του αρχείου κειμένου `last-ip.txt` γράφοντας μια κενή συμβολοσειρά σε αυτό με την εντολή “echo "" > /home/pi/Desktop/ip2discord/last-ip.txt”. Στη συνέχεια, ξεκινά έναν ατέρμονα βρόχο με την εντολή “while ;; do ...; done”, εκτελώντας το αρχείο Python (“/usr/bin/python3 /home/pi/Desktop/ip2discord/send_ip_to_discord.py”) κάθε 5 δευτερόλεπτα (“sleep 5”).
- Τέλος, η ενότητα “[Install]” περιέχει την εντολή “WantedBy=multi-user.target”, διασφαλίζοντας ότι η υπηρεσία ξεκινά στο επίπεδο λειτουργίας “multi-user”. Αυτό το επίπεδο λειτουργίας είναι μια κοινή λειτουργική κατάσταση για τα συστήματα Linux όπου εκτελούνται οι περισσότερες υπηρεσίες του συστήματος, συνήθως αντιστοιχεί στο επίπεδο λειτουργίας 3 σε παραδοσιακούς όρους του Unix.

Με τη ρύθμιση του αρχείου υπηρεσίας με αυτόν τον τρόπο, το Raspberry Pi διαμορφώνεται ώστε να εκτελεί αυτόματα το σενάριο “send_ip_to_discord.py” κατά την εκκίνηση και έπειτα κάθε 5 δευτερόλεπτα. Το σενάριο στέλνει μηνύματα σε ένα κανάλι στο

Παράρτημα ΣΤ: Αποστολή Μηνυμάτων από το Raspberry Pi προς έναν Server της Κοινωνικής Πλατφόρμας Discord

Discord και η υπηρεσία χειρίζεται τυχόν διακοπές ή επανεκκινήσεις με την επανεκτέλεση του σεναρίου όταν χρειάζεται. Αυτή η αυτοματοποίηση διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία του σεναρίου, χωρίς να είναι απαραίτητη η χειροκίνητη παρέμβαση.

Τέλος, εκτελέστηκαν στο τερματικό οι εξής τρεις εντολές:

```
$ sudo systemctl daemon-reload
$ sudo systemctl enable my-discord-webhook.service
$ sudo systemctl start my-discord-webhook.service
```

Η πρώτη εντολή επαναφορτώνει τα αρχεία υπηρεσιών, αναγνωρίζοντας οποιοσδήποτε αλλαγές ή νέες υπηρεσίες. Η δεύτερη εντολή ενεργοποιεί την υπηρεσία ώστε να ξεκινά αυτόματα κατά την εκκίνηση του συστήματος και, τέλος, η τρίτη εντολή ξεκινά την υπηρεσία άμεσα. Αυτές οι εντολές χρησιμοποιούνται συνδυαστικά για να διασφαλιστεί ότι μια υπηρεσία έχει ρυθμιστεί σωστά, είναι ενεργοποιημένη να εκκινεί αυτόματα και είναι άμεσα λειτουργική.

Βιβλιογραφία

1. Maxwell, J.C. VIII. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **1865**, 155, 459–512, doi:10.1098/rstl.1865.0008.
2. Griffiths, D. *Introduction to Electrodynamics*; 4th ed.; Cambridge University Press, 2017; ISBN 1-108-42041-9.
3. Serway, R.A.; Jewett, J.W. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*; Cengage Learning, 2018; ISBN 978-1-337-55329-2.
4. Young, H.D.; Freedman, R.A. *University Physics*; Addison-Wesley Publishing Company, 1996; ISBN 978-0-201-57156-1.
5. Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. *Fundamentals of Physics*; John Wiley & Sons, 2010; ISBN 978-0-470-46911-8.
6. Balanis, C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*; John Wiley & Sons, 2016; ISBN 978-1-118-64206-1.
7. Stutzman, W.L.; Thiele, G.A. *Antenna Theory and Design*; John Wiley & Sons, 2012; ISBN 978-0-470-57664-9.
8. Balanis, C.A. *Advanced Engineering Electromagnetics*; John Wiley & Sons, 2012; ISBN 978-0-470-58948-9.
9. Knight, R.D. *Physics for Scientists and Engineers*; Pearson Education (US), 2012; ISBN 978-0-321-73608-6.
10. Shankar, R. *Fundamentals of Physics II: Electromagnetism, Optics, and Quantum Mechanics*; Yale University Press, 2016; ISBN 978-0-300-22115-2.
11. Rappaport *Wireless Communications: Principles and Practice*; Dorling Kindersley, 2009; ISBN 978-81-317-2882-6.
12. Friis, H.T. A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE* **1946**, 34, 254–256, doi:10.1109/JRPROC.1946.234568.
13. Barclay, L. *Propagation of Radiowaves*; IET, 2003; ISBN 978-0-85296-102-5.
14. Pozar, D.M. *Microwave Engineering, 4th Edition*; Wiley, 2011; ISBN 978-1-118-21363-6.
15. MD, T.H.L.; Lee, T.H. *Planar Microwave Engineering: A Practical Guide to Theory, Measurement, and Circuits*; Cambridge University Press, 2004; ISBN 978-0-521-83526-8.
16. IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. *IEEE Std 521-2002 (Revision of IEEE Std 521-1984)* **2003**, 0_1-3, doi:10.1109/IEEESTD.2003.94224.
17. Dera, J. *Marine Physics*; Elsevier, 1992; ISBN 978-0-08-087091-5.
18. Wozniak, B.; Dera, J. *Light Absorption in Sea Water*; Springer Science & Business Media, 2007; ISBN 978-0-387-49560-6.
19. Sogandares, F.M.; Fry, E.S. Absorption Spectrum (340–640 Nm) of Pure Water I Photothermal Measurements. *Appl. Opt.* **1997**, 36, 8699, doi:10.1364/AO.36.008699.
20. Pope, R.M.; Fry, E.S. Absorption Spectrum (380–700 Nm) of Pure Water. II. Integrating Cavity Measurements. *Appl. Opt., AO* **1997**, 36, 8710–8723, doi:10.1364/AO.36.008710.

Βιβλιογραφία

21. Zolotarev, V.M.; Mikhilov, B.A.; Alperovich, L.L.; Popov, S.I. Dispersion and Absorption of Liquid Water in the Infrared and Radio Regions of the Spectrum. *Optics and Spectroscopy* **1969**, *27*, 430–432.
22. Pope, R.M. *Optical Absorption of Pure Water and Sea Water Using the Integrating Cavity Absorption Meter*; 1993;
23. Tam, A.C.; Patel, C.K.N. Optical Absorptions of Light and Heavy Water by Laser Optoacoustic Spectroscopy. *Appl. Opt.*, *AO* **1979**, *18*, 3348–3358, doi:10.1364/AO.18.003348.
24. Hale, G.M.; Query, M.R. Optical Constants of Water in the 200-Nm to 200-Microm Wavelength Region. *Appl Opt* **1973**, *12*, 555–563, doi:10.1364/AO.12.000555.
25. Smith, R.C.; Baker, K.S. Optical Properties of the Clearest Natural Waters (200–800 Nm). *Appl. Opt.*, *AO* **1981**, *20*, 177–184, doi:10.1364/AO.20.000177.
26. Segelstein, D.J. The Complex Refractive Index of Water. Thesis, University of Missouri--Kansas City, 1981.
27. Wieliczka, D.M.; Weng, S.; Query, M.R. Wedge Shaped Cell for Highly Absorbent Liquids: Infrared Optical Constants of Water. *Appl. Opt.*, *AO* **1989**, *28*, 1714–1719, doi:10.1364/AO.28.001714.
28. John David Jackson *Classical Electrodynamics*; 2nd ed.; 1975;
29. van Leth, T.C.; Overeem, A.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R. A Measurement Campaign to Assess Sources of Error in Microwave Link Rainfall Estimation. *Atmospheric Measurement Techniques* **2018**, *11*, 4645–4669, doi:https://doi.org/10.5194/amt-11-4645-2018.
30. Cermak, D.; Fiser, O.; Schejbal, V. Electromagnetic Scattering by Rain. **2005**.
31. Atlas, D.; Ulbrich, W. Path-Integrated and Area-Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation in the 1-3 Cm Band. *Journal of Applied Meteorology* **1977**, 1322–1331, doi:10.1175/1520-0450(1977)016<1322:PAAIRM>2.0.CO;2.
32. Sene, K. *Hydrometeorology: Forecasting and Applications*; Springer Netherlands: Dordrecht, 2010; ISBN 978-90-481-3402-1.
33. Fotiadi, A.K.; Metaxas, D.A.; Bartzokas, A. A Statistical Study of Precipitation in Northwest Greece. *International Journal of Climatology* **1999**, *19*, 1221–1232, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199909)19:11<1221::AID-JOC436>3.0.CO;2-H.
34. Giannetti, F.; Reggiannini, R.; Moretti, M.; Adirosi, E.; Baldini, L.; Facheris, L.; Antonini, A.; Melani, S.; Bacci, G.; Petrolino, A.; et al. Real-Time Rain Rate Evaluation via Satellite Downlink Signal Attenuation Measurement. *Sensors* **2017**, *17*, 1864, doi:10.3390/s17081864.
35. Strangeways, I. *Precipitation: Theory, Measurement and Distribution*; Cambridge University Press, 2007; ISBN 978-0-521-85117-6.
36. Testik, F.Y.; Gebremichael, M. *Rainfall: State of the Science*; John Wiley & Sons, 2013; ISBN 978-1-118-67154-2.
37. Uijlenhoet, R.; Overeem, A.; Leijnse, H. Opportunistic Remote Sensing of Rainfall Using Microwave Links from Cellular Communication Networks. *WIREs Water* **2018**, *5*, e1289, doi:10.1002/wat2.1289.
38. Brauer, C.C.; Overeem, A.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R. The Effect of Differences between Rainfall Measurement Techniques on Groundwater and Discharge Simulations in a Lowland Catchment. *Hydrological Processes* **2016**, *30*, 3885–3900, doi:10.1002/hyp.10898.

39. Messer, H. Capitalizing on Cellular Technology—Opportunities and Challenges for Near Ground Weather Monitoring. *Environments* **2018**, *5*, 73, doi:10.3390/environments5070073.
40. Chwala, C.; Kunstmann, H. Commercial Microwave Link Networks for Rainfall Observation: Assessment of the Current Status and Future Challenges. *WIREs Water* **2019**, *6*, e1337, doi:10.1002/wat2.1337.
41. Medhurst, R. Rainfall Attenuation of Centimeter Waves: Comparison of Theory and Measurement. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **1965**, *13*, 550–564, doi:10.1109/TAP.1965.1138472.
42. Attenuation of 1.25-Centimeter Radiation through Rain | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore Available online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1697356> (accessed on 1 June 2024).
43. Harrold, T.W. Attenuation of 8.6 Mm-Wavelength Radiation in Rain. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* **1967**, *114*, 201–203, doi:10.1049/piee.1967.0035.
44. Overeem, A.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R. Measuring Urban Rainfall Using Microwave Links from Commercial Cellular Communication Networks. *Water Resources Research* **2011**, *47*, doi:10.1029/2010WR010350.
45. Chwala, C.; Gmeiner, A.; Qiu, W.; Hipp, S.; Nienaber, D.; Siart, U.; Eibert, T.; Pohl, M.; Seltmann, J.; Fritz, J.; et al. Precipitation Observation Using Microwave Backhaul Links in the Alpine and Pre-Alpine Region of Southern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences* **2012**, *16*, 2647–2661, doi:https://doi.org/10.5194/hess-16-2647-2012.
46. Overeem, A.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R. Country-Wide Rainfall Maps from Cellular Communication Networks. *PNAS* **2013**, *110*, 2741–2745, doi:10.1073/pnas.1217961110.
47. Bianchi, B.; Rieckermann, J.; Berne, A. Quality Control of Rain Gauge Measurements Using Telecommunication Microwave Links. *Journal of Hydrology* **2013**, *492*, 15–23, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.03.042.
48. Bianchi, B.; Leeuwen, P.J. van; Hogan, R.J.; Berne, A. A Variational Approach to Retrieve Rain Rate by Combining Information from Rain Gauges, Radars, and Microwave Links. *Journal of Hydrometeorology* **2013**, *14*, 1897–1909, doi:10.1175/JHM-D-12-094.1.
49. Doumounia, A.; Gosset, M.; Cazenave, F.; Kacou, M.; Zougmore, F. Rainfall Monitoring Based on Microwave Links from Cellular Telecommunication Networks: First Results from a West African Test Bed. *Geophysical Research Letters* **2014**, *41*, 6016–6022, doi:10.1002/2014GL060724.
50. Cherkassky, D.; Ostrometzky, J.; Messer, H. Precipitation Classification Using Measurements From Commercial Microwave Links. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2014**, *52*, 2350–2356, doi:10.1109/TGRS.2013.2259832.
51. Cherkassky, D.; Ostrometzky, J.; Messer, H. The Use of Linear Feature Projection for Precipitation Classification Using Measurements from Commercial Microwave Links. In *Proceedings of the Latent Variable Analysis and Signal Separation*; Theis, F., Cichocki, A., Yeredor, A., Zibulevsky, M., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2012; pp. 511–519.
52. Imran, I.A.; Sani, S.M. Prediction Model for GSM Signal Attenuation in the Abis Interface during Heavy Rainfall in Nigeria.
53. Fencl, M.; Rieckermann, J.; Sýkora, P.; Stránský, D.; Bareš, V. Commercial Microwave Links Instead of Rain Gauges: Fiction or Reality? *Water Sci Technol* **2015**, *71*, 31–37, doi:10.2166/wst.2014.466.

Βιβλιογραφία

54. Olsen, R.; Rogers, D.; Hodge, D. The aRbrelation in the Calculation of Rain Attenuation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **1978**, *26*, 318–329, doi:10.1109/TAP.1978.1141845.
55. RECOMMENDATION ITU-R P.838-3 - Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods. 8.
56. Chwala, C.; Keis, F.; Kunstmann, H. Real-Time Data Acquisition of Commercial Microwave Link Networks for Hydrometeorological Applications. *Atmospheric Measurement Techniques* **2016**, *9*, 991–999, doi:https://doi.org/10.5194/amt-9-991-2016.
57. Overeem, A.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R. Two and a Half Years of Country-Wide Rainfall Maps Using Radio Links from Commercial Cellular Telecommunication Networks. *Water Resources Research* **2016**, *52*, 8039–8065, doi:10.1002/2016WR019412.
58. D’Amico, M.; Manzoni, A.; Solazzi, G.L. Use of Operational Microwave Link Measurements for the Tomographic Reconstruction of 2-D Maps of Accumulated Rainfall. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2016**, *13*, 1827–1831, doi:10.1109/LGRS.2016.2614326.
59. Rios Gaona, M.F.; Overeem, A.; Raupach, T.H.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R. Rainfall Retrieval with Commercial Microwave Links in São Paulo, Brazil. *Atmospheric Measurement Techniques* **2018**, *11*, 4465–4476, doi:https://doi.org/10.5194/amt-11-4465-2018.
60. Al-Samman, A.M.; Mohamed, M.; Ai, Y.; Cheffena, M.; Azmi, M.H.; Rahman, T.A. Rain Attenuation Measurements and Analysis at 73 GHz E-Band Link in Tropical Region. *IEEE Communications Letters* **2020**, *24*, 1368–1372, doi:10.1109/LCOMM.2020.2983361.
61. Pudashine, J.; Guyot, A.; Petitjean, F.; Pauwels, V.R.N.; Uijlenhoet, R.; Seed, A.; Prakash, M.; Walker, J.P. Deep Learning for an Improved Prediction of Rainfall Retrievals From Commercial Microwave Links. *Water Resources Research* **2020**, *56*, e2019WR026255, doi:10.1029/2019WR026255.
62. de Vos, L.W.; Droste, A.M.; Zander, M.J.; Overeem, A.; Leijnse, H.; Heusinkveld, B.G.; Steeneveld, G.J.; Uijlenhoet, R. Hydrometeorological Monitoring Using Opportunistic Sensing Networks in the Amsterdam Metropolitan Area. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **2020**, *101*, E167–E185, doi:10.1175/BAMS-D-19-0091.1.
63. Song, K.; Liu, X.; Gao, T. Real-Time Rainfall Estimation Using Microwave Links: A Case Study in East China during the Plum Rain Season in 2020. *Sensors* **2021**, *21*, 858, doi:10.3390/s21030858.
64. Overeem, A.; Leijnse, H.; Leth, T.C. van; Bogerd, L.; Priebe, J.; Tricarico, D.; Droste, A.; Uijlenhoet, R. Tropical Rainfall Monitoring with Commercial Microwave Links in Sri Lanka. *Environ. Res. Lett.* **2021**, *16*, 074058, doi:10.1088/1748-9326/ac0fa6.
65. Pudashine, J.; Guyot, A.; Overeem, A.; Pauwels, V.R.N.; Seed, A.; Uijlenhoet, R.; Prakash, M.; Walker, J.P. Rainfall Retrieval Using Commercial Microwave Links: Effect of Sampling Strategy on Retrieval Accuracy. *Journal of Hydrology* **2021**, *603*, 126909, doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126909.
66. Saggese, F.; Lottici, V.; Giannetti, F. Rainfall Map from Attenuation Data Fusion of Satellite Broadcast and Commercial Microwave Links. *Sensors* **2022**, *22*, 7019, doi:10.3390/s22187019.
67. Daher, A.; Al Sakka, H.; Chaaban, A.K. Low Complexity Single-Layer Neural Network for Enhanced Rainfall Estimation Using Microwave Links. *Journal of Hydroinformatics* **2022**, *25*, 101–112, doi:10.2166/hydro.2022.099.

68. Zheng, X.; Messer, H.; Wang, Q.; Xu, T.; Qin, Y.; Yang, T. On the Potential of Commercial Microwave Link Networks for High Spatial Resolution Rainfall Monitoring in Urban Areas. *Atmospheric Research* **2022**, *277*, 106289, doi:10.1016/j.atmosres.2022.106289.
69. Graf, M.; Wagner, A.; Polz, J.; Lliso, L.; Lahuerta, J.A.; Kunstmann, H.; Chwala, C. Improved Rain Event Detection in Commercial Microwave Link Time Series via Combination with MSG SEVIRI Data. *Atmospheric Measurement Techniques* **2024**, *17*, 2165–2182, doi:10.5194/amt-17-2165-2024.
70. Liu, X.; Zhao, K.; Zou, M.; Pu, K.; Song, K. Rainfall Monitoring Using a Microwave Links Network: A Long-Term Experiment in East China. *Adv. Atmos. Sci.* **2023**, *40*, 1567–1583, doi:10.1007/s00376-023-2104-z.
71. Blettner, N.; Fencil, M.; Bareš, V.; Kunstmann, H.; Chwala, C. Transboundary Rainfall Estimation Using Commercial Microwave Links. *Earth and Space Science* **2023**, *10*, e2023EA002869, doi:10.1029/2023EA002869.
72. Odedina, M.O.; Afullo, T.J. Determination of Rain Attenuation from Electromagnetic Scattering by Spherical Raindrops: Theory and Experiment. *Radio Science* **2010**, *45*, doi:10.1029/2009RS004192.
73. Zamora, J.L.F.; Ching, R.H.N.; Abrajano, G.D.; Tangonan, G.L.; Libatique, N.J.C.; Guico, M.L.; Lamac, R. Rain-Induced Disaster Alarm System Using Microwave and Acoustic Sensing. In Proceedings of the 2011 IEEE Global Humanitarian Technology Conference; October 2011; pp. 437–441.
74. EFFECT OF RAINFALL ON LINK QUALITY IN AN OUTDOOR FOREST DEPLOYMENT: In Proceedings of the Proceedings of the International Conference on Wireless Information Networks and Systems; SciTePress - Science and and Technology Publications: University of Piraeus, Greece, 2010; pp. 148–153.
75. E.a, K.; C.n, V.; E.h, P.; A.d, S.; H.e, N. Maximum Rain-Rate Evaluations in Aegean Archipelagos Hellas for Rain Attenuation Modeling at Microwave Frequencies. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety od Sea Transportation* **2016**, *10*.
76. Christofilakis, V.; Tatsis, G.; Votis, C.T.; Chronopoulos, S.K.; Kostarakis, P.; Lolis, C.J.; Bartzokas, A. Rainfall Measurements Due to Radio Frequency Signal Attenuation at 2 GHz. *Journal of Signal and Information Processing* **2018**, *9*, 192–201, doi:10.4236/jsip.2018.93011.
77. Christofilakis, V.; Tatsis, G.; Lolis, C.J.; Chronopoulos, S.K.; Kostarakis, P.; Bartzokas, A.; Nistazakis, H.E. A Rain Estimation Model Based on Microwave Signal Attenuation Measurements in the City of Ioannina, Greece. *Meteorological Applications* **2020**, *27*, e1932, doi:10.1002/met.1932.
78. Shayea, I.; Abd. Rahman, T.; Hadri Azmi, M.; Islam, Md.R. Real Measurement Study for Rain Rate and Rain Attenuation Conducted Over 26 GHz Microwave 5G Link System in Malaysia. *IEEE Access* **2018**, *6*, 19044–19064, doi:10.1109/ACCESS.2018.2810855.
79. Song, K.; Liu, X.; Gao, T.; Yin, M.; He, B. The Feasibility Analysis of Cellphone Signal to Detect the Rain: Experimental Study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2020**, *17*, 1158–1162, doi:10.1109/LGRS.2019.2940854.
80. Moroder, C.; Siart, U.; Chwala, C.; Kunstmann, H. Microwave Instrument for Simultaneous Wet Antenna Attenuation and Precipitation Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **2020**, *69*, 5853–5861, doi:10.1109/TIM.2019.2961498.

Βιβλιογραφία

81. Fang, S.-H.; Yang, Y.-H.S. The Impact of Weather Condition on Radio-Based Distance Estimation: A Case Study in GSM Networks With Mobile Measurements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **2016**, *65*, 6444–6453, doi:10.1109/TVT.2015.2479591.
82. Beritelli, F.; Capizzi, G.; Lo Sciuto, G.; Napoli, C.; Scaglione, F. Rainfall Estimation Based on the Intensity of the Received Signal in a LTE/4G Mobile Terminal by Using a Probabilistic Neural Network. *IEEE Access* **2018**, *6*, 30865–30873, doi:10.1109/ACCESS.2018.2839699.
83. Leijnse, H.; Uijlenhoet, R.; Berne, A. Errors and Uncertainties in Microwave Link Rainfall Estimation Explored Using Drop Size Measurements and High-Resolution Radar Data. *J. Hydrometeor.* **2010**, *11*, 1330–1344, doi:10.1175/2010JHM1243.1.
84. Schleiss, M.; Berne, A. Identification of Dry and Rainy Periods Using Telecommunication Microwave Links. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2010**, *7*, 611–615, doi:10.1109/LGRS.2010.2043052.
85. Zinevich, A.; Messer, H.; Alpert, P. Prediction of Rainfall Intensity Measurement Errors Using Commercial Microwave Communication Links. *Atmospheric Measurement Techniques* **2010**, *3*, 1385–1402, doi:https://doi.org/10.5194/amt-3-1385-2010.
86. Schleiss, M.; Rieckermann, J.; Berne, A. Quantification and Modeling of Wet-Antenna Attenuation for Commercial Microwave Links. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2013**, *10*, 1195–1199, doi:10.1109/LGRS.2012.2236074.
87. Hoedjes, J.C.B.; Kooiman, A.; Maathuis, B.H.P.; Said, M.Y.; Becht, R.; Limo, A.; Mumo, M.; Nduhiu-Mathenge, J.; Shaka, A.; Su, B. A Conceptual Flash Flood Early Warning System for Africa, Based on Terrestrial Microwave Links and Flash Flood Guidance. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **2014**, *3*, 584–598, doi:10.3390/ijgi3020584.
88. Messer, H.; Sendik, O. A New Approach to Precipitation Monitoring: A Critical Survey of Existing Technologies and Challenges. *IEEE Signal Processing Magazine* **2015**, *32*, 110–122, doi:10.1109/MSP.2014.2309705.
89. Ostrometzky, J.; Eshel, A. Empirical Study of the Quantization Induced Bias in Commercial Microwave Links' Min/Max Attenuation Measurements for Rain Monitoring. *Environments* **2018**, *5*, 80, doi:10.3390/environments5070080.
90. Overeem, A.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R. Rainfall Monitoring Using Microwave Links from Cellular Communication Networks: The Dutch Experience. In Proceedings of the 2018 IEEE Statistical Signal Processing Workshop, SSP 2018; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., August 29 2018; pp. 110–114.
91. Messer, H. Wireless Communication Links as Opportunistic IoT for Near Ground Rain Monitoring. In Proceedings of the 2018 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP); IEEE: Freiburg im Breisgau, Germany, June 2018; pp. 115–119.
92. Valtr, P.; Fencel, M.; Bareš, V. Excess Attenuation Caused by Antenna Wetting of Terrestrial Microwave Links at 32 GHz. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **2019**, *18*, 1636–1640, doi:10.1109/LAWP.2019.2925455.
93. Zhang, P.; Liu, X.; Pu, K. Precipitation Monitoring Using Commercial Microwave Links: Current Status, Challenges and Prospectives. *Remote Sensing* **2023**, *15*, 4821, doi:10.3390/rs15194821.
94. Wennerström, H.; Hermans, F.; Rensfelt, O.; Rohner, C.; Nordén, L.-Å. A Long-Term Study of Correlations between Meteorological Conditions and 802.15.4 Link Performance. In

- Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking (SECON); June 2013; pp. 221–229.
95. Luomala, J.; Hakala, I. Effects of Temperature and Humidity on Radio Signal Strength in Outdoor Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS); September 2015; pp. 1247–1255.
 96. Bauer, J.; Aschenbruck, N. Towards a Low-Cost RSSI-Based Crop Monitoring. *ACM Trans. Internet Things* **2020**, *1*, 21:1-21:26, doi:10.1145/3393667.
 97. Rodić, L.D.; Županović, T.; Perković, T.; Šolić, P.; Rodrigues, J.J.P.C. Machine Learning and Soil Humidity Sensing: Signal Strength Approach. *ACM Trans. Internet Technol.* **2021**, *22*, 39:1-39:21, doi:10.1145/3418207.
 98. Guidara, A.; Fersi, G.; Derbel, F.; Jemaa, M.B. Impacts of Temperature and Humidity Variations on RSSI in Indoor Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science* **2018**, *126*, 1072–1081, doi:10.1016/j.procs.2018.08.044.
 99. Goldoni, E.; Savazzi, P.; Favalli, L.; Vizziello, A. Correlation between Weather and Signal Strength in LoRaWAN Networks: An Extensive Dataset. *Computer Networks* **2022**, *202*, 108627, doi:10.1016/j.comnet.2021.108627.
 100. Platform Architecture Available online: <https://developer.android.com/guide/platform> (accessed on 11 May 2024).
 101. Android Available online: <https://www.android.com/> (accessed on 11 May 2024).
 102. Meet Android Studio Available online: <https://developer.android.com/studio/intro> (accessed on 13 May 2024).
 103. 3GPP LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (3GPP TS 36.101 Version 17.11.0 Release 17) Available online: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2411> (accessed on 22 January 2024).
 104. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Radio Transmission and Reception (3GPP TS 05.05 Version 8.20.0 Release 1999) Available online: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=258> (accessed on 16 June 2024).
 105. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+) (GSM); GSM/EDGE Radio Transmission and Reception (3GPP TS 45.005 Version 18.0.0 Release 18) Available online: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2709> (accessed on 16 June 2024).
 106. 3GPP Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (FDD) (3GPP TS 25.101 Version 17.0.0 Release 17) Available online: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1151> (accessed on 19 May 2024).
 107. Gehring, J. Jjoe64/GraphView 2024.
 108. Background Execution Limits Available online: <https://developer.android.com/about/versions/oreo/background> (accessed on 14 May 2024).
 109. Severance, C. Eben Upton: Raspberry Pi. *Computer* **2013**, *46*, 14–16, doi:10.1109/MC.2013.349.

Βιβλιογραφία

110. Raspberry Pi, Product Catalogue, 2023 Available online: <https://datasheets.raspberrypi.com/product/product-catalogue-2023.pdf> (accessed on 2 March 2024).
111. Raspberry Pi 4 Model B Datasheet.Pdf Available online: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf> (accessed on 29 February 2024).
112. Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi Hardware Available online: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html> (accessed on 3 March 2024).
113. Raspberry Pi Documentation Available online: <https://www.raspberrypi.com/documentation/> (accessed on 3 March 2024).
114. Halfacree, G. *The Official Raspberry Pi Beginner's Guide: How to Use Your New Computer*; Raspberry Pi (Trading) Limited, 2019; ISBN 978-1-912047-58-1.
115. Raspberry Pi AD/DA Expansion Board Available online: <https://www.waveshare.com/high-precision-ad-da-board.htm> (accessed on 9 March 2024).
116. LM78Lxx 100-mA Fixed Output Linear Regulator Available online: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm78l.pdf> (accessed on 12 April 2020).
117. DAC8552, 16-BIT, DUAL CHANNEL, ULTRA-LOW GLITCH, VOLTAGE OUTPUT DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER Available online: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8552.pdf?ts=1710005819857&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (accessed on 9 March 2024).
118. ADS1255, ADS1256, Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter Available online: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1256.pdf?ts=1710008752361&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fde-de%252FADS1256 (accessed on 9 March 2024).
119. Τσούκα, Α. Θεωρητική Μελέτη Και Κατασκευή Κεραίας Χοάνης Και Exciter. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων: Ιωάννινα, 2006.
120. Coaxial Resonator Oscillator-CRO CVCO55CC-1912-2114 Available online: <https://www.crystek.com/microwave/admin/webapps/welcome/files/vco/cvco55cc-1912-2114.pdf> (accessed on 17 March 2024).
121. HMC429LP4 / 429LP4E Available online: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc429.pdf> (accessed on 17 March 2024).
122. HMC358MS8G / 358MS8GE Available online: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc358.pdf> (accessed on 17 March 2024).
123. HMC536MS8G / 536MS8GE Available online: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc536.pdf> (accessed on 17 March 2024).
124. ZX60-83LN-S+ Available online: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-83LN-S+.pdf> (accessed on 17 March 2024).
125. ZSR SERIES - 3.0 to 12 Volt Fixed Positive Local Voltage Regulator Available online: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ZSR.pdf> (accessed on 19 March 2024).
126. 2N3906 - General Purpose Transistors PNP Silicon.

127. 2N4403 - General Purpose Transistors PNP Silicon Available online: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n4403-d.pdf> (accessed on 19 March 2024).
128. General Purpose Transistors NPN Silicon, 2N3903, 2N3904 Available online: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3903-d.pdf> (accessed on 19 March 2024).
129. Thin-Film RF/Microwave Filters - BP0805 Band Pass Filter SMD 5W Available online: <https://datasheets.kyocera-avx.com/AVX-BP0805-ITF-Filter.pdf> (accessed on 25 March 2024).
130. Ceramic LTCC Bandpass Filter - BFCV-5270+ Available online: <https://www.minicircuits.com/pdfs/BFCV-5270+.pdf> (accessed on 25 March 2024).
131. AD8318 - 1 MHz to 8 GHz, 70 dB Logarithmic Detector/Controller Available online: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8318.pdf> (accessed on 25 March 2024).
132. MashaMSFT SQL Server Technical Documentation - SQL Server Available online: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/sql-server/?view=sql-server-ver16> (accessed on 28 March 2024).
133. markingmyname SQL Server Configuration Manager - SQL Server Available online: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/relational-databases/sql-server-configuration-manager?view=sql-server-ver16> (accessed on 28 March 2024).
134. markingmyname SQL Server Management Studio (SSMS) - SQL Server Management Studio (SSMS) Available online: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/ssms/sql-server-management-studio-ssms?view=sql-server-ver16> (accessed on 28 March 2024).
135. David-Engel Microsoft ODBC Driver for SQL Server - ODBC Driver for SQL Server Available online: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/connect/odbc/microsoft-odbc-driver-for-sql-server?view=sql-server-ver16> (accessed on 28 March 2024).
136. Tatsis, G.; Votis, C.; Christofilakis, V.; Kostarakis, P.; Tritakis, V.; Repapis, C. A Prototype Data Acquisition and Processing System for Schumann Resonance Measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **2015**, *135*, 152–160, doi:10.1016/j.jastp.2015.11.001.
137. Kester, W. Taking the Mystery out of the Infamous Formula, “ $SNR = 6.02N + 1.76dB$,” and Why You Should Care. 7.
138. Mohanta, H.C.; Kouzani, A.Z.; Mandal, S.K. Reconfigurable Antennas and Their Applications. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering* **2019**, *6*, 239–258, doi:10.13189/ujeee.2019.060406.
139. Christodoulou, C.G.; Tawk, Y.; Lane, S.A.; Erwin, S.R. Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications. *Proceedings of the IEEE* **2012**, *100*, 2250–2261, doi:10.1109/JPROC.2012.2188249.
140. Ojaroudi Parchin, N.; Jahanbakhsh Basherlou, H.; Al-Yasir, Y.I.A.; M. Abdulkhaleq, A.; A. Abd-Alhameed, R. Reconfigurable Antennas: Switching Techniques—A Survey. *Electronics* **2020**, *9*, 336, doi:10.3390/electronics9020336.
141. Costantine, J.; Tawk, Y.; Barbin, S.E.; Christodoulou, C.G. Reconfigurable Antennas: Design and Applications. *Proceedings of the IEEE* **2015**, *103*, 424–437, doi:10.1109/JPROC.2015.2396000.
142. Ojaroudi Parchin, N.; Jahanbakhsh Basherlou, H.; Al-Yasir, Y.I.A.; Abd-Alhameed, R.A.; Abdulkhaleq, A.M.; Noras, J.M. Recent Developments of Reconfigurable Antennas for

- Current and Future Wireless Communication Systems. *Electronics* **2019**, *8*, 128, doi:10.3390/electronics8020128.
143. Kumar, D.; Siddiqui, A.S.; Singh, H.P.; Tripathy, M.R.; Sharma, A. A Review: Techniques and Methodologies Adopted for Reconfigurable Antennas. In Proceedings of the 2018 International Conference on Sustainable Energy, Electronics, and Computing Systems (SEEMS); October 2018; pp. 1–6.
 144. Tawk, Y.; Costantine, J.; Ayoub, F.; Christodoulou, C.; Doyle, D.; Lane, S.A. Physically Reconfigurable Antennas: Concepts and Automation. In Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting; July 2017; pp. 419–420.
 145. Sharma, A.; Rathi, A.; Al-Khafaji, H.M.R.; Siddiqui, M.G.; Yadav, A.K.S. Hybrid Mode Reconfigurable Antenna with V-Shaped Extrudes for Cognitive Radio Applications. *Electronics* **2023**, *12*, 1680, doi:10.3390/electronics12071680.
 146. Luo, Q.; Pereira, J.R.; Salgado, H.M. Reconfigurable Dual-Band C-Shaped Monopole Antenna Array with High Isolation. *Electronics Letters* **2010**, *46*, 888–889, doi:10.1049/el.2010.8846.
 147. Ullah, S.; Elfergani, I.; Ahmad, I.; Din, I.U.; Ullah, S.; Rehman Khan, W.U.; Ahmad, T.; Habib, U.; Zebiri, C.; Rodriguez, J. A Compact Frequency and Radiation Reconfigurable Antenna for 5G and Multistandard Sub-6 GHz Wireless Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing* **2022**, *2022*, e4658082, doi:10.1155/2022/4658082.
 148. Tawk, Y.; Costantine, J.; Avery, K.; Christodoulou, C.G. Implementation of a Cognitive Radio Front-End Using Rotatable Controlled Reconfigurable Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **2011**, *59*, 1773–1778, doi:10.1109/TAP.2011.2122239.
 149. George, R.; Kumar, S.; Gangal, S.A.; Joshi, M. FREQUENCY RECONFIGURABLE PIXEL ANTENNA WITH PIN DIODES. *PIER Letters* **2019**, *86*, 59–65, doi:10.2528/PIERL19051803.
 150. Hassan, M.M.; Zahid, Z.; Khan, A.A.; Rashid, I.; Rauf, A.; Maqsood, M.; Bhatti, F.A. Two Element MIMO Antenna with Frequency Reconfigurable Characteristics Utilizing RF MEMS for 5G Applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* **2020**, *34*, 1210–1224, doi:10.1080/09205071.2020.1765883.
 151. Palsokar, A.A.; Lahudkar, S.L. Frequency and Pattern Reconfigurable Rectangular Patch Antenna Using Single PIN Diode. *AEU - International Journal of Electronics and Communications* **2020**, *125*, 153370, doi:10.1016/j.aeue.2020.153370.
 152. Tu, D.T.T.; Cao, S.; Duong, H. An Open Double Ring Antenna with Multiple Reconfigurable Feature for 5G/IoT below 6GHz Applications. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* **2022**, *11*, 310–318, doi:10.11591/eei.v11i1.3337.
 153. Singh, A.; Dubey, R.; Jatav, R.; Meshram, M.K. Electronically Reconfigurable Microstrip Antenna with Steerable Beams. *AEU - International Journal of Electronics and Communications* **2022**, *149*, 154179, doi:10.1016/j.aeue.2022.154179.
 154. Muthuvel, S.K.; Choukiker, Y.K. Wideband Frequency Agile and Polarization Reconfigurable Antenna for Wireless Applications. *IETE Journal of Research* **2023**, *69*, 1529–1538, doi:10.1080/03772063.2020.1871421.
 155. Al-Yasir, Y.I.A.; Abdullah, A.S.; Ojaroudi Parchin, N.; Abd-Alhameed, R.A.; Noras, J.M. A New Polarization-Reconfigurable Antenna for 5G Applications. *Electronics* **2018**, *7*, 293, doi:10.3390/electronics7110293.

156. Valdes, J.L.; Huitema, L.; Arnaud, E.; Passerieux, D.; Crunteanu, A. A Polarization Reconfigurable Patch Antenna in the Millimeter-Waves Domain Using Optical Control of Phase Change Materials. *IEEE Open J. Antennas Propag.* **2020**, *1*, 224–232, doi:10.1109/OJAP.2020.2996767.
157. Mansoul, A.; Ghanem, F.; Hamid, M.R.; Trabelsi, M. A Selective Frequency-Reconfigurable Antenna for Cognitive Radio Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **2014**, *13*, 515–518, doi:10.1109/LAWP.2014.2311114.
158. Jenath Sathikbasha, M.; Nagarajan, V. Design of Multiband Frequency Reconfigurable Antenna with Defected Ground Structure for Wireless Applications. *Wireless Pers Commun* **2020**, *113*, 867–892, doi:10.1007/s11277-020-07256-8.
159. Selvam, Y.P.; Kanagasabai, M.; Alsath, M.G.N.; Velan, S.; Kingsly, S.; Subbaraj, S.; Ramana Rao, Y.V.; Srinivasan, R.; Varadhan, A.K.; Karuppiyah, M. A Low-Profile Frequency- and Pattern-Reconfigurable Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **2017**, *16*, 3047–3050, doi:10.1109/LAWP.2017.2759960.
160. Ullah, S.; Ahmad, S.; Khan, B.A.; Flint, J.A. A Multi-Band Switchable Antenna for Wi-Fi, 3G Advanced, WiMAX, and WLAN Wireless Applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* **2018**, *10*, 991–997, doi:10.1017/S1759078718000776.
161. Dildar, H.; Althobiani, F.; Ahmad, I.; Khan, W.U.R.; Ullah, S.; Mufti, N.; Ullah, S.; Muhammad, F.; Irfan, M.; Glowacz, A. Design and Experimental Analysis of Multiband Frequency Reconfigurable Antenna for 5G and Sub-6 GHz Wireless Communication. *Micromachines* **2021**, *12*, 32, doi:10.3390/mi12010032.
162. Ullah, S.; Ahmad, I.; Raheem, Y.; Ullah, S.; Ahmad, T.; Habib, U. Hexagonal Shaped CPW Feed Based Frequency Reconfigurable Antenna for WLAN and Sub-6 GHz 5G Applications. In Proceedings of the 2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST); March 2020; pp. 1–4.
163. Boukarkar, A.; Rachdi, S.; Mohamed Amine, M.; Sami, B.; Benziane Khalil, A. A Compact Four States Radiation-Pattern Reconfigurable Monopole Antenna for Sub-6 GHz IoT Applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications* **2023**, *158*, 154467, doi:10.1016/j.aeue.2022.154467.
164. Shah, I.A.; Hayat, S.; Khan, I.; Alam, I.; Ullah, S.; Afridi, A. A Compact, Tri-Band and 9-Shape Reconfigurable Antenna for WiFi, WiMAX and WLAN Applications. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies* **6**, 45.
165. Shah, S. a. A.; Khan, M.F.; Ullah, S.; Basir, A.; Ali, U.; Naeem, U. Design and Measurement of Planar Monopole Antennas for Multi-Band Wireless Applications. *IETE Journal of Research* **2017**, *63*, 194–204, doi:10.1080/03772063.2016.1261049.
166. SMP1302 Series: Switch and Attenuator Plastic-Packaged PIN Diodes Available online: https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/2801-2900/SMP1302_Series_200043AB.pdf (accessed on 24 May 2024).
167. Lifländer, J. Radiated Efficiency: A True Measure of Antenna Performance Available online: <https://www.mouser.com/pdfDocs/radiatedefficiencyatruemeasureofantennaperformance.pdf> (accessed on 25 May 2024).
168. RECOMMENDATION ITU-R P.453-9 - The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data.
169. Ενημερωτική Πύλη Κατασκευών Κεραίων Available online: <https://keraies.eett.gr/> (accessed on 14 February 2024).

Βιβλιογραφία

170. Coppersmith, D.; Hong, S.J.; Hosking, J.R.M. Partitioning Nominal Attributes in Decision Trees. *Data Mining and Knowledge Discovery* **1999**, *3*, 197–217, doi:10.1023/A:1009869804967.
171. Loh, W.-Y.; Shih, Y.-S. Split Selection Methods for Classification Trees. *Statistica Sinica* **1997**, *7*, 815–840.
172. Breiman, L.; Friedman, J.; Olshen, R.A.; Stone, C.J. *Classification and Regression Trees*; Chapman and Hall/CRC: New York, 2017; ISBN 978-1-315-13947-0.
173. Fit Binary Decision Tree for Multiclass Classification - MATLAB Fitctree Available online: <https://www.mathworks.com/help/stats/fitctree.html> (accessed on 8 June 2024).
174. Cortes, C.; Vapnik, V. Support-Vector Networks. *Mach Learn* **1995**, *20*, 273–297, doi:10.1007/BF00994018.
175. Train Support Vector Machine (SVM) Classifier for One-Class and Binary Classification - MATLAB Fitcsvm Available online: <https://www.mathworks.com/help/stats/fitcsvm.html> (accessed on 8 June 2024).
176. Cover, T.; Hart, P. Nearest Neighbor Pattern Classification. *IEEE Transactions on Information Theory* **1967**, *13*, 21–27, doi:10.1109/TIT.1967.1053964.
177. Fit K-Nearest Neighbor Classifier - MATLAB Fitcknn Available online: <https://www.mathworks.com/help/stats/fitcknn.html> (accessed on 8 June 2024).
178. Freund, Y.; Schapire, R.E. A Desicion-Theoretic Generalization of on-Line Learning and an Application to Boosting. In Proceedings of the Computational Learning Theory; Vitányi, P., Ed.; Springer: Berlin, Heidelberg, 1995; pp. 23–37.
179. Fit Ensemble of Learners for Classification - MATLAB Fitcensemble Available online: <https://www.mathworks.com/help/stats/fitcensemble.html> (accessed on 8 June 2024).
180. Geva, M.; Schuster, R.; Berant, J.; Levy, O. Transformer Feed-Forward Layers Are Key-Value Memories. In Proceedings of the Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing; Moens, M.-F., Huang, X., Specia, L., Yih, S.W., Eds.; Association for Computational Linguistics: Online and Punta Cana, Dominican Republic, November 2021; pp. 5484–5495.
181. Generate Feedforward Neural Network - MATLAB Feedforwardnet Available online: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/feedforwardnet.html> (accessed on 8 June 2024).
182. Motorola, Inc. SPI Block Guide V03.06 Available online: <https://web.archive.org/web/20150413003534/http://www.ee.nmt.edu/~teare/ee308l/datasheets/S12SPIV3.pdf> (accessed on 7 March 2024).
183. Russell, J.; Cohn, R. *Serial Peripheral Interface Bus*; Book on Demand, 2012; ISBN 978-5-513-50493-1.
184. Leens, F. An Introduction to I2C and SPI Protocols. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine* **2009**, *12*, 8–13, doi:10.1109/MIM.2009.4762946.

Σύντομο Βιογραφικό

Ο Αλέξανδρος Σακκάς γεννήθηκε στα Ιωάννινα το 1994. Το 2017 έλαβε πτυχίο Φυσικής από το Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Στη συνέχεια, το 2020, έλαβε μεταπτυχιακό δίπλωμα ειδίκευσης στις “Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Τεχνολογίες” από το ίδιο Τμήμα. Στη μεταπτυχιακή του διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την ανάπτυξη μιας πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση και την καταγραφή της ισχύος σήματος στην κατώτερη μικροκυματική περιοχή. Επί του παρόντος είναι υποψήφιος διδάκτορας στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικής, Τηλεπικοινωνιών και Εφαρμογών του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, με αντικείμενο την ανάπτυξη ενός συστήματος τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση της έντασης της βροχής μέσω της εξασθένησης που προκαλεί σε μικροκυματικά σήματα. Τα κύρια ερευνητικά του ενδιαφέροντα είναι η εξασθένηση σήματος λόγω της βροχής, η τηλεπισκόπηση και τα συστήματα συλλογής δεδομένων. Επιπλέον, είναι εξοικειωμένος με διάφορες γλώσσες προγραμματισμού, συμπεριλαμβανομένων των C/C++, Python, Kotlin, HTML, CSS, JavaScript, MATLAB κλπ., καθώς και με διάφορα περιβάλλοντα όπως τα CST Studio Suite, OrCAD, NI Multisim, LabVIEW, Android Studio, Atmel Studio κλπ. Ακόμα, έχει συνεισφέρει σε 7 δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές. Τέλος, έχει συμμετάσχει σε ένα training school στο Πότσταμ της Γερμανίας, σχετικό με προηγμένες μεθόδους ανάλυσης δεδομένων.

Δημοσιεύσεις

1. Sakkas, A.; Christofilakis, V.; Lolis, C.J.; Chronopoulos, S.K.; Peppas, K.P. Precipitation Measurements in the S and C bands using a High-Precision Setup (Under Review).
2. Sakkas, A.; Christofilakis, V.; Lolis, C.J.; Chronopoulos, S.K.; Tatsis, G. Harnessing the Radio Frequency Power Level of Cellular Terminals for Weather Parameter Sensing. *Electronics* **2024**, *13*, 840, doi:[10.3390/electronics13050840](https://doi.org/10.3390/electronics13050840).
3. Sakkas, A.; Oikonomou, V.; Mystridis, G.; Christofilakis, V.; Tatsis, G.; Baldoumas, G.; Tritiakakis, V.; Chronopoulos, S.K. A Frequency-Selective Reconfigurable Antenna for Wireless Applications in the S and C Bands. *Sensors* **2023**, *23*, 8912, doi:[10.3390/s23218912](https://doi.org/10.3390/s23218912).
4. Sakkas, A.; Christofilakis, V.; Tatsis, G.; Baldoumas, G.; Evangelou, E.K.; Nistazakis, H.E. A Portable RF Signal Attenuation Testbed. In Proceedings of the 2023 12th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST); June 2023.
5. Tatsis, G.; Sakkas, A.; Christofilakis, V.; Baldoumas, G.; Chronopoulos, S.K.; Paschalidou, A.K.; Kassomenos, P.; Petrou, I.; Kostarakis, P.; Repapis, C.; et al. Correlation of Local Lightning Activity with Extra Low Frequency Detector for Schumann Resonance Measurements. *Science of The Total Environment* **2021**, 147671, doi:[10.1016/j.scitotenv.2021.147671](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147671).
6. Christofilakis, V.; Tatsis, G.; Chronopoulos, S.K.; Sakkas, A.; Skrivanos, A.G.; Peppas, K.P.; Nistazakis, H.E.; Baldoumas, G.; Kostarakis, P. Earth-to-Earth Microwave Rain Attenuation Measurements: A Survey On the Recent Literature. *Symmetry* **2020**, *12*, 1440, doi:[10.3390/sym12091440](https://doi.org/10.3390/sym12091440).
7. Tatsis, G.; Christofilakis, V.; Chronopoulos, S.K.; Baldoumas, G.; Sakkas, A.; Paschalidou, A.K.; Kassomenos, P.; Petrou, I.; Kostarakis, P.; Repapis, C.; et al. Study of the Variations in the Schumann Resonances Parameters Measured in a Southern Mediterranean Environment. *Science of The Total Environment* **2020**, *715*, 136926, doi:[10.1016/j.scitotenv.2020.136926](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136926).